

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Měření vícecestného šíření rádiového signálu v zástavbě**  
**Measurement of multipath propagation of radio signal in**  
**built-up area**

**2015**

**Bc. Tomáš Šmíd**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Šmíd**  
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2612T059 Mobilní technologie  
Téma: **Měření vícecestného šíření rádiového signálu v zástavbě.**  
**Measurement of Multipath Propagation of Radio Signal in Built-up Area.**

Zásady pro vypracování:

Problematika vícecestného šíření rádiového signálu je popsána mnoha empirickými modely.

Student má za úkol:

1. Popsat modely šíření elektromagnetického signálu v zastavěném prostoru.
2. Nasimulovat a změřit vliv vícecestného šíření a úniky na zadané ploše v zástavbě na zadaných kmitočtech.
3. Vyhodnotit naměřená data a zakreslit tyto jevy plošně do fotografie či mapy prostoru.

Seznam doporučené odborné literatury:

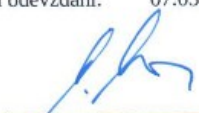
BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. 5. 2015

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval *Ing. Marku Dvorskému, Ph.D.* za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tématem této diplomové práce je měření vícecestného šíření rádiového signálu v zástavbě.

Teoretická část práce je věnována elektromagnetickému signálu, popisuje jednotlivé radiové vlny a způsoby šíření elektromagnetického signálu v prostoru. Dále detailně popisuje jednotlivé modely, které slouží pro teoretickou simulaci šíření elektromagnetického signálu v zastavěném prostoru.

Praktická část práce se věnuje měření vícecestného šíření rádiového signálu v areálu Vysoké školy báňské. Práce porovnává výsledky získané simulacemi s naměřenými výsledky.

Pro simulace byla použita studentská verze programu Radiowave Propagation Simulator od firmy Radioplan GmbH.

Pro měření byla použita všesměrová anténa a spektrální analyzátor Rohde & Schwarz FSH8.

## **Klíčová slova**

elektromagnetické vlny; elektromagnetický signál; grafy; matlab; praktické měření; rádiový signál; simulace; spektrální analyzátor ; úniky signálu; úroveň signálů; všesměrová anténa;

## **Abstract**

The theme of this thesis is the Measurement of multipath propagation of radio signal in built-up area.

The theoretical part is devoted to the electromagnetic signal. Describes each radio waves and ways of propagation of the electromagnetic the signal in space. This thesis describes in detail the different models which are used for the theoretical simulation of the electromagnetic signal in built-up area.

The practical part is devoted to the measurement of multipath radio signal in the area of the VSB. This thesis compares results obtained from simulations with measured results.

For the simulation was used student version of radiowave Propagation Simulator from Radioplan GmbH.

For measurements were used omnidirectional antenna and spectrum analyzer Rohde & Schwarz FSH8.

## **Key words**

electromagnetic waves; electromagnetic signal; fading; graphs; level signals; matlab; omnidirectional antenna; practical measurement; radio signal; simulation; spectrum analyzer;

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>AWGN</b>	Aditivní bílý Gaussovský šum
<b>BSS</b>	Systém základnových stanic
<b>BTS</b>	Základnová převodní stanice
<b>CPIT</b>	Vědecko-výzkumné laboratoře
<b>ČTÚ</b>	Český telekomunikační úřad
<b>DECT</b>	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
<b>ERP</b>	Efektivní vyzářený výkon
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission
<b>FEI</b>	Fakulta elektrotechniky a informatiky
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>NK</b>	Nová knihovna
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Telephone
<b>OFDM</b>	Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
<b>RADAR</b>	Radio Detecting And Ranging
<b>RPS</b>	Radiowave Propagation Simulator
<b>SH</b>	Sportovní hala
<b>TL</b>	Těžké laboratoře
<b>UTMS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>ÚG</b>	Ústav geoniky
<b>VEC</b>	Výzkumné energetické centrum
<b>VF</b>	Vysoko frekvenční
<b>VSH</b>	Víceúčelová sportovní hala
<b>VŠB</b>	Vysoká škola Báňská
<b>WI-FI</b>	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Šíření elektromagnetického signálu .....	- 2 -
1.1 Radiové vlny .....	- 10 -
1.2 Způsoby šíření elektromagnetického signálu v prostoru.....	- 13 -
1.3 Modely šíření elektromagnetického signálu v zástavbě.....	- 18 -
1.3.1 ONE-SLOPE model .....	- 23 -
1.3.2 DUAL-SLOPE model .....	- 24 -
1.3.3 HATŮV model .....	- 25 -
1.3.4 BERGŮV REKURZIVNÍ MODEL .....	- 26 -
1.3.5 LEE model.....	- 27 -
1.3.6 OPTICKÉ modely .....	- 29 -
1.3.7 MULTI-WALL model .....	- 30 -
1.3.8 WALFISH-IKEGAMI model.....	- 31 -
2 Měření vícecestného šíření radiového signálu v zástavbě.....	- 36 -
2.1 Popis praktického měření .....	- 36 -
2.2 Simulace a měření vícecestného šíření radiového signálu v budově.....	- 37 -
2.3 Simulace a měření vícecestného šíření radiového signálu v zástavbě.....	- 52 -
Závěr .....	- 63 -
Použitá literatura .....	- 64 -
Seznam příloh.....	- 66 -



## Úvod

Námět této diplomové práce „Měření vícecestného šíření rádiového signálu v zástavbě“ je věnován sledování vlivů vícecestného šíření a úniků signálu v areálu Vysoké školy báňské.

Pro přenos informací radiového, televizního, mobilního, bezdrátového signálu apod. slouží elektromagnetické vlny (elektromagnetický signál). Vznik a šíření elektromagnetického signálů je popsán v první části diplomové práce. První část práce dále popisuje jednotlivé modely, které jsou určeny pro teoretickou simulaci šíření elektromagnetického signálu v zástavbě.

Druhá část práce se zabývá simulacemi a měření vlivů vícecestného šíření rádiového signálu v areálu Vysoké školy báňské. Simulace a měření jsou provedeny na 5. patře budovy Fakulty elektrotechniky a informatiky a na vybraných místech v areálu Vysoké školy báňské.

Simulace jsou vypracovány studentskou verzí simulačního programu Radiowave Propagation Simulator od firmy Radioplan GmbH (RPS 5.3). Pro praktické měření je využita všesměrová anténa a spektrální obvodový analyzátor Rohde & Schwarz FSH8.

Úkolem diplomové práce je porovnat mnou vytvořené simulace s naměřenými výsledky.

Cílem diplomové práce je vyhodnotit simulační a naměřená data a zakreslit vlivy vícecestného šíření a úniky signálu plošně do mapy prostoru.

# 1 Šíření elektromagnetického signálu

Šíření signálu mezi přijímačem a vysílačem (obr. 1.1) je zprostředkováno pomocí elektromagnetických vln.

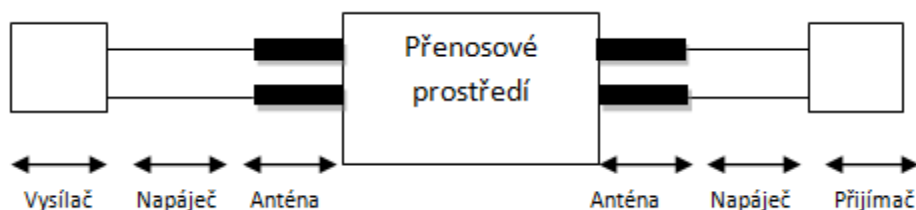
Šíření elektromagnetických vln vychází z vlnové rovnice. Elektromagnetické vlny jsou charakterizovány parametry, jako jsou pracovní frekvence (kmitočet) a vlnová délka. [1]

Pro znalost šíření elektromagnetických vln je potřeba znát prostředí, kde se vlny šíří a souřadnice umístění antén, mezi kterými se vlny šíří. Dále je potřeba znát vlastnosti antén, které přeměňují energii šířící se po vedení k vysílači na energii šířící se prostorem a naopak. Dále vlastnosti napájecích vedení antén od koncového stupně vysílače do antény a naopak od antény na vstup přijímače. Neméně důležitá je znalost vlastnosti prostoru (rozměry objektů v prostředí) mezi přijímací a vysílací anténou. [2]

V přenosovém prostředí se vyskytují různé vnější vlivy, které neprospívají ideálnímu šíření signálu (dále jen „poruchy“): [3]

- přirozené poruchy: poruchy způsobené sluncem, kosmickými tělesy nebo bouřkami apod.
- elektrizační poruchy: poruchy způsobené písečnou bouří, sněhovou bouří apod.
- průmyslové poruchy: poruchy způsobené vlaky, auty apod.
- jiné poruchy: poruchy způsobené rušením jiných rádiových vysílačů

Na přijímací anténě je elektromagnetický signál zkreslen šumy. Šumy deformují užitečný elektromagnetický signál.



Obrázek 1.1: Schematické rádiový spojovací řetězec

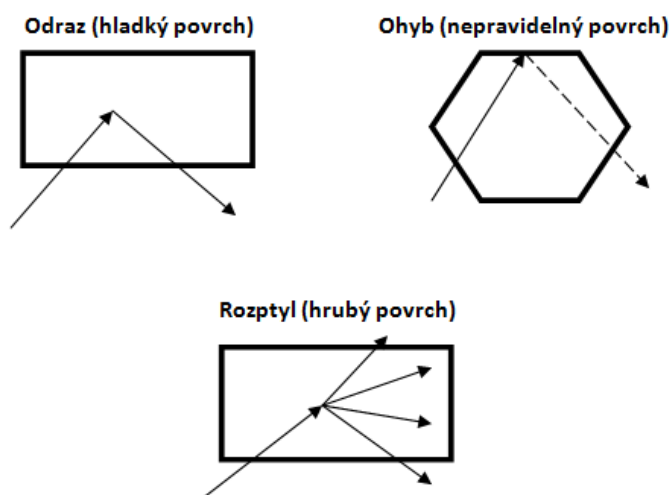
Rádiový spojovací řetězec znázorňuje přenos elektromagnetického signálu z vysílače na přijímač (Obr. 1.1). Rádiový spojovací řetězec se skládá:

- vysílač: transformuje nízkofrekvenční signál na signál vysokofrekvenční (signál pro přenos rádiovým kanálem)
- napáječ: přenáší vysokofrekvenční signál k vysílací anténě
- vysílací anténa: vysílá radiové vlny
- rádiový kanál (přenosové prostředí): jedná se o médium pro přenos radiové vlny
- přijímací anténa: zachycuje radiové vlny

- napáječ: přenáší radiové vlny od přijímací antény k přijímači
- rádiový přijímač: zpracovává rádiové signály

Elektromagnetický signál se může šířit z vysílače na přijímač těmito způsoby (Obr. 1.2): [4]

- šíření volným prostorem: tento způsob šíření signálu probíhá, pokud mezi vysílací a přijímací stranou je přímá optická viditelnost
- odraz signálů: tento způsob šíření signálů se objevuje, pokud radiová vlna dopadá na překážku, velkou v porovnání s délkou vlny. Signál, který dopadá na překážku je rozdělen na dvě části. První část signálu může vnikat do překážky, druhá část se od překážky odráží.
- ohyb signálů: tento způsob šíření signálů se objevuje, pokud radiový signál dopadá na překážku, která má ostré obrysové hrany a zastiňuje trasu optické přímé viditelnosti. Ohyb signálů vzniká například na ostrých vrcholech hor a podobně.
- rozptyl signálů: tento způsob šíření signálů se objevuje, pokud radiová vlna prochází nebo dopadá na překážku, která je složena z většího počtu elementů, které jsou malé v porovnání s délkou radiové vlny. [4]



Obrázek 1.2: Šíření elektromagnetického signálu při odrazu, ohybu, rozptylu [4]

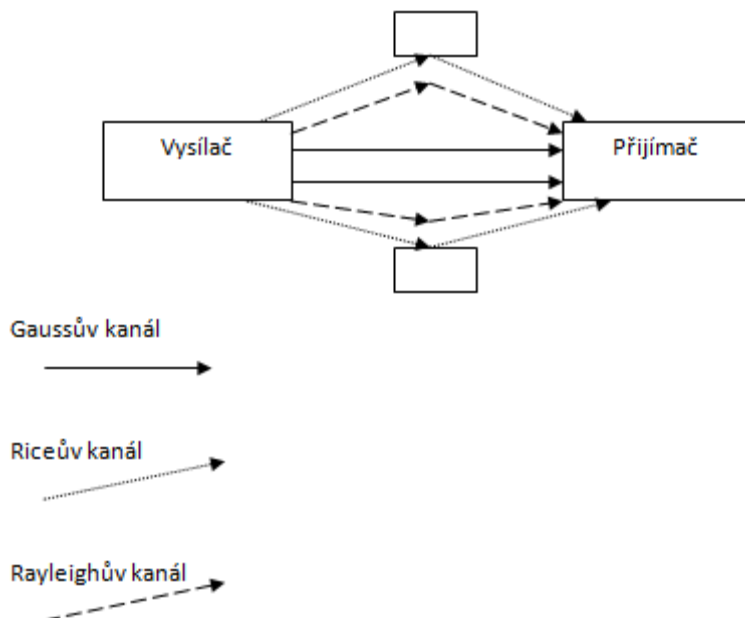
### • Přenosové kanály

Elektromagnetický signál, který se šíří mezi vysílačem a přijímačem pouze jednou cestou bez odrazů, je popsán modelem Gaussova kanálu (obr. 1.3). Gaussův kanál poskytuje ideální podmínky pro příjem signálu (dat). Přijímaný signál (data) je ovlivněn aditivním bílým Gaussovským šumem (AWGN), který je generován přijímačem. Aditivní šum je způsoben šumem přijímače a různými nežádoucími vlivy v okolí daného spojení. [5]

Riceův kanál (obr. 1.3) modeluje situace, kdy je k elektromagnetickému signálu se přidají další odražené signály. V tomto případě se kvalita přijímaného signálu výrazně zhoršuje.

Signál se zhoršuje vlivem vícecestného šíření signálu. Riceův kanál dále modeluje situace, kdy dochází ke kolísání intenzity signálu. Kolísání intenzity signálu je způsobeno například pohybem přijímače a změnou prostředí. [5]

Rayleighův kanál (obr.1.3) modeluje situace, kdy není zajištěno, že přímý signál bude dominantním. Tento kanál modeluje situace, kdy mezi vysílačem a přijímačem jsou nejhorší podmínky (odražené signály, apod.). [5]



Obrázek 1.3: Zobrazení šíření rádiových vln přes Gaussův, Riceův a Rayleighův kanál

Více o přenosových kanálech se lze dočíst v literatuře [5].

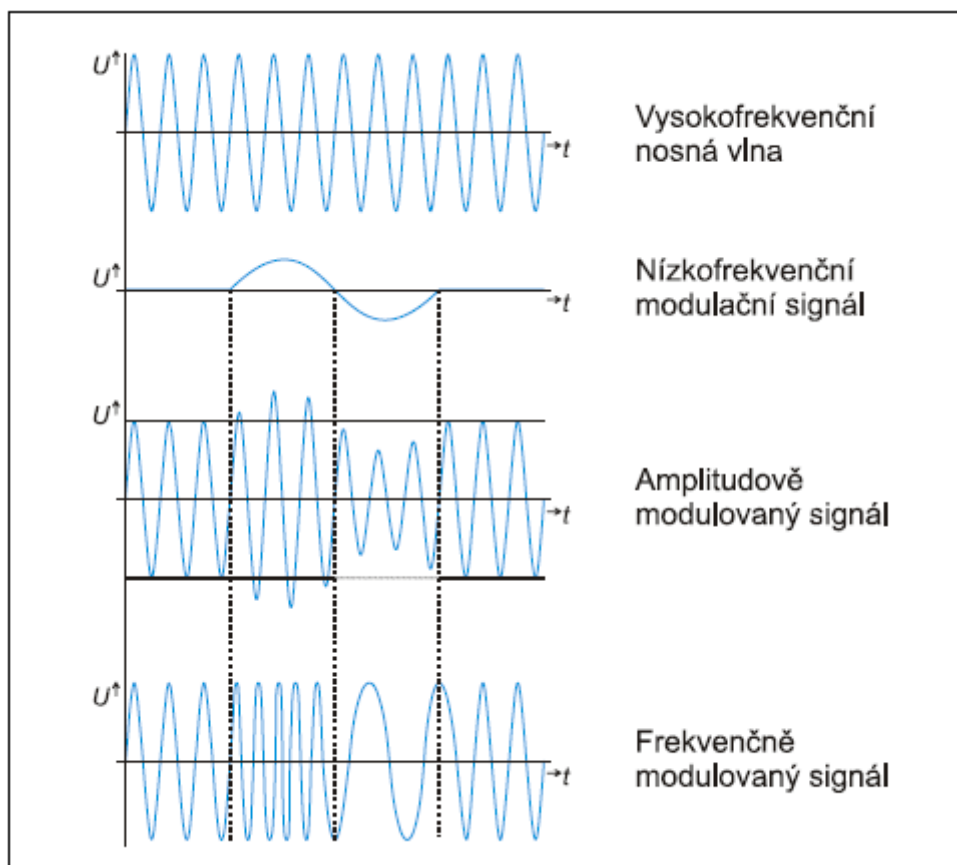
### • Modulace

Pro přenos informace prostřednictvím elektromagnetického signálu je potřeba signál modulovat na vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění. Modulace probíhá pomocí modulátoru. Mezi druhy modulace patří (obr. 1.4):

- amplitudová modulace (AM): amplituda vysokofrekvenční nosné vlny se mění v závislosti na přenášeném nízkofrekvenčním signálu. Frekvence nosné vlny zůstává stejná.
- frekvenční modulace (FM): amplituda vysokofrekvenční nosné vlny se nemění v závislosti na přenášeném nízkofrekvenčním signálu. Frekvence nosné vlny se mění působením nízkofrekvenčního modulačního signálu.

Frekvenční modulace má lepší vlastnosti než amplitudová modulace. Mezi výhody frekvenční modulace patří jednodušší modulátor, menší vzájemné rušení dvou vysílačů, které pracují na stejné frekvenci, lepší záruka přenosu informace. Mezi nevýhody frekvenční modulace patří složitější demodulátor. [6]

Frekvenční modulace je vhodná pro metrové vlny viz kap. 1.1.



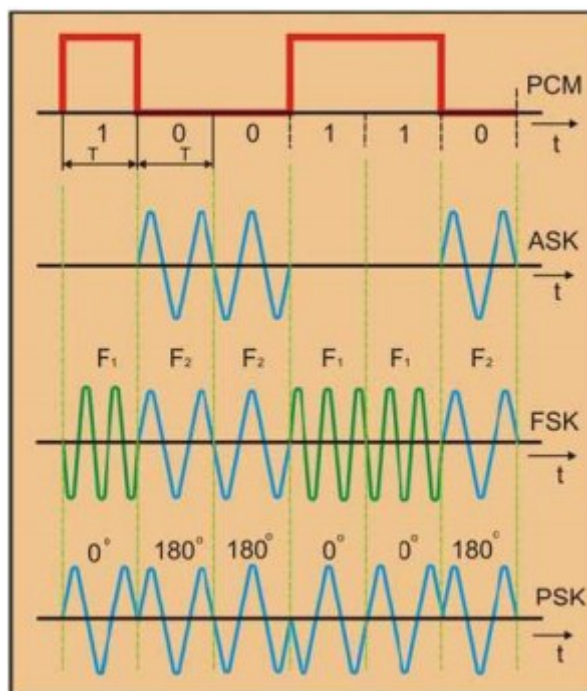
Obrázek 1.4: *Amplitudová modulace, Frekvenční modulace [7]*

Pokud vř (vysoko frekvenční) nosná vlna je modulovaná signálem některé diskrétní modulace v základním pásmu, jedná se o digitální modulace. K modulaci se ve většině případů využívá binární modulační signál. Pomocí binárního signálu je možné modulovat amplitudu, kmitočet a fázi nosné vlny. [21]

Mezi základní digitální modulace patří:

- Klíčování amplitudovým posuvem (ASK modulace)
- Klíčování frekvenčním posuvem (FSK modulace)
- Klíčování fázovým posuvem (PSK modulace)

Na obrázku (obr 1.5) jsou znázorněny časové průběhy modulovaných signálů pro jednotlivé základní typy modulací.



Obrázek 1.5: Časové průběhy modulovaných signálů [21]

Více o jednotlivých modulacích se lze dočíst v literatuře [6].

Vícecestné šíření vln signálu má velký dopad na digitální modulace. Vícecestné šíření signálu mimo jiné vzniká odrazem elektromagnetické vlny od překážek, či od země v okolí přijímače. Většina odražených signálů má velmi malé časové zpoždění (desítky nanosekund až jednotky mikrosekund). Při přenosu dat vysokými rychlostmi je časová délka jednoho bitu srovnatelná s časovým zpožděním odraženého signálu, dochází k deformaci tvaru dat. Rozdělením toku dat na více subnosných kmitočtů je možné vzdorovat účinkům vícecestného šíření signálu. Tyto subnosné kmitočty se vysílají současně a jsou modulovány daty s nízkou přenosovou rychlostí. Z tohoto důvodu nedochází k deformaci tvaru dat, jelikož 1 bit datového signálu má v porovnání s časovým zpožděním odraženého signálu delší dobu trvání.

Pro odolnost vícecestného šíření signálu při přenosu vln signálu se používá širokopásmová modulace OFDM (ortogonální multiplex s frekvenčním dělením). Vícecestným šířením signálu dochází k mezisymbolovým přeslechům. Pro potlačení mezisymbolových interferencí je překaždým OFDM symbolem ochranný interval. V tomto intervalu se nevysílá žádný signál (vysílá se signál nulový). Díky toho zpožděné signály (způsobeny vícecestným šířením) z předchozího symbolu neovlivňují aktuální symbol. [22] [23]

V systému OFDM se nosné kmitočty mohou mezi sebou překrývat, jelikož jsou navzájem ortogonální. Z toho vyplývá užší potřebná šířka pásma při stejné přenosové rychlosti.

Na přenos elektromagnetického signálu mezi vysílací a přijímací anténou má vliv: [8]

- směrová a vyzařovací charakteristika přijímací a vysílací antény
- polarizační vlastnosti antén

- vstupní a výstupní impedance antén
- prostředí mezi anténami
- délka spoje
- výška antén
- vzdálenost mezi anténami
- úniky signálu (pomalé, rychlé)
- elektrické vlastnosti prostředí
- frekvence a délka elektromagnetické vlny
- přítomnost nehomogenit troposféry
- stav ionosféry
- odrazy signálu
- zástavba, lesy, skály, moře apod.

Šíření elektromagnetických vln v přenosovém prostředí je ovlivněno vlastnostmi prostředí, jako jsou permitivita, permeabilita a konduktivita.

Permitivita je vlastnost, která popisuje vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a elektrické indukce v materiálu nebo vakuu.

Permeabilita je vlastnost, která popisuje vztah mezi vektory intenzity magnetického pole a magnetické indukce.

Konduktivita je vlastnost, které popisuje vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a proudové hustoty.

Signál mezi vysílací a přijímací stranou se může šířit těmito cestami: [8]

- země - země (oba body spojení leží na zemi)
- země – kosmos (řízení oběžných družic, nutné vysoké frekvence spojení)
- kosmos – země (GPS, signály z meteorologických družic)
- kosmos – kosmos (spojení mezi družicemi)
- země – kosmos – země (televizní satelitní vysílání, satelitní telefon)
- země – tropo/stratosféra – země (letecká technika, radiolokace)
- země – kosmická tělesa – země (slunce, měsíc, planety)

Vztah pro výpočet délky elektromagnetické vlny (vlnová délka) :

$$\lambda = \frac{v}{T} \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

Elektromagnetické vlny se také šíří ve vakuu (vesmír), kde je jejich rychlost konstantní a rovna  $c = 3 \cdot 10^8$ .

$\lambda$  (m) – vlnová délka

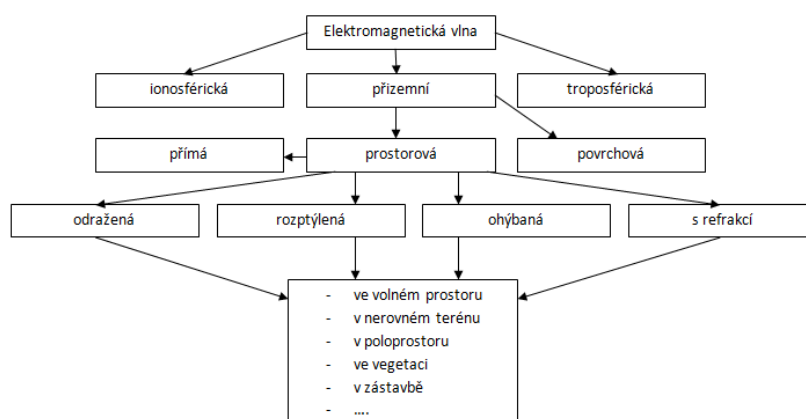
$v$  (m/s) – rychlost šíření (v prostředí)

$c$  (m/s) – rychlost šíření (ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$ ))

$T$  (s) – perioda

$f$  (Hz) - frekvence

Délka elektromagnetické vlny (vlnová délka) je dána vzdáleností dvou sousedních bodů, které mají stejnou fázi kmitání. Čím je větší frekvence  $f$  [Hz], tím menší je vlnová délka. Tento vztah má vliv na ohyb a odraz vln na překážkách.



Obrázek 1.6: *Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní radiové spoje*

Stupnice elektromagnetických vln:

- gama záření ( $\lambda \in \sim 0\text{nm}, \sim 0,006\text{nm}$ )
- rentgenové záření ( $\lambda \in \sim 0,006\text{nm}, \sim 10\text{nm}$ )
- ultrafialové záření ( $\lambda \in \sim 10\text{nm}, \sim 380\text{nm}$ )
- viditelné záření ( $\lambda \in \sim 380\text{nm}, \sim 760\text{nm}$ )
- infračervené záření ( $\lambda \in \sim 760\text{nm}, \sim 1\text{cm}$ )
- rádiové záření ( $\lambda \in \sim 1\text{cm}, \sim \text{km}$ )

Šíření elektromagnetických vln se rozlišuje podle typu pozemního rádiového spoje. Jednotlivé typy rádiového spoje se dělí na:

- pevný spoj: radiokomunikační služba mezi stanovenými pevnými body (spojení typu "bod-bod").
- mobilní spoj: radiokomunikační služba mezi základnovými stanicemi a pozemními pohyblivými stanicemi nebo mezi pozemními pohyblivými stanicemi navzájem.
- spoj (rozhlasová služba): radiokomunikační služba, kdy vysílání je určené k přímému příjmu širokou veřejností (spojen typu "bod-plocha"). [10]

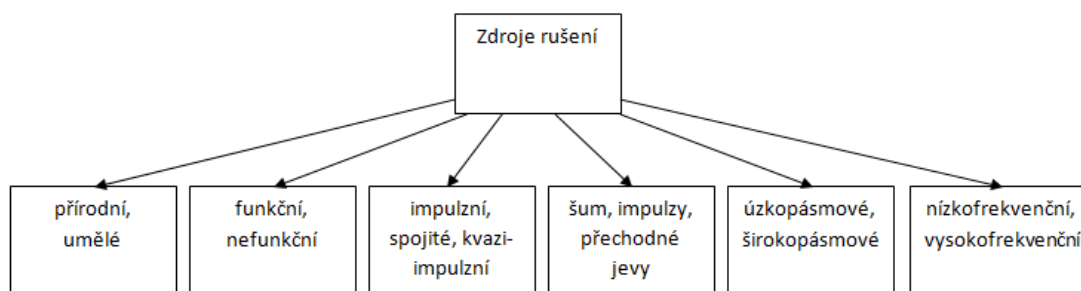


Aby se zamezilo vzájemnému ovlivňování elektromagnetický vln z různých vysílačů, zajišťuje přidělování daných kmitočtových pásem Český telekomunikační úřad (ČTÚ)

Mezi další významné instituce, které se zabývají přidělováním (standardizací) kmitočtových pásem v daných oblastech, jsou European Telecommunications Standards Institute (ETSI) a Federal Communications Commission (FCC).

- **Zdroje rušení signálu**

Elektromagnetický signál, může být rušen různými jevy. Rušený signál ztrácí kvalitu. Mezi zdroje elektromagnetického rušení patří například přístroje nebo přírodní jevy (obr. 1.7).



Obrázek 1.7: *Zdroje elektromagnetického rušení*

Přírodní zdroje rušení signálů vznikají přirozenou cestou a nelze jim zabránit. Umělé zdroje rušení signálů vznikají lidskou technickou činností.

K funkčním zdrojům rušení signálů patří zdroje, mezi jehož hlavní funkce patří šíření (vypuštění) elektromagnetického signálu. K nefunkčním zdrojům šíření signálů patří zdroje, mezi jejichž hlavní funkce nepatří šíření elektromagnetického signálu. V tomto případě je šíření elektromagnetického signálu vedlejším (nežádoucím) produktem. [11]

Impulzivní rušení je takové rušení, které působí na rušené zařízení v různých časových posloupnostech. Spojité rušení je takové rušení, které působí na rušené zařízení nepřetržitě. Kvazi-impulzní rušení je takové rušení, které je kombinací impulzivního a spojitého rušení. [11]

Mezi další zdroje rušení signálu patří šum, impulzy a přechodné jevy.

Šum deformuje užitečný elektromagnetický signál. Šum je dán jako náhodný signál, který se nachází při provozu elektrických a elektronických součástek a obvodů. Impulzy jsou rušivé signály impulzivního charakteru s velkým poměrem velikostí vzruchů k době jejich trvání. Přechodné jevy jsou rušivé signály, které se vyskytují náhodně. Přechodné jevy se vyskytují například při náhlých změnách v energetických sítích při zapínání nebo vypínání spotřebiče velkého výkonu. Přechodné jevy trvají od několika milisekund do několika sekund. [11]

Mezi úzkopásmové rušení patří signály rozhlasových a televizních vysílačů. Mezi širokopásmové rušení patří signály různých průmyslových zařízení. [11]

Více o zdrojích rušení signálu se lze dočíst v literatuře [11].

## 1.1 Radiové vlny

Mezi elektromagnetické vlny patří radiové vlny. Radiové vlny jsou nedílnou součástí radiové komunikace, kterou využívají mobilní telefony. Radiovou komunikaci umožňují rádiové sítě v různých frekvenčních pásmech. Mezi rádiové sítě patří NMT (Nordic Mobile Telephony), GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci), UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systém), systémy bezšňůrových telefonů DECT a bezdrátových sítí Wi-fi (Wireless Ethernet Compatibility Alliance). Šíření radiových vln bylo původně využíváno pro rozhlasové a televizní vysílání. V současnosti se radiové vlny ve velké míře používají v mobilní komunikaci a v bezdrátových sítích. Radiové sítě jsou rozděleny na jednotlivá pásma viz. (tab.1.1). Každé pásmo má přidělenou frekvenci (rozmezí), na kterém probíhá komunikace. Dělení na jednotlivá pásma probíhá z důvodu velkého počtu šířících se signálů. [12]

Návrh radiových spojů se zpracovává třemi způsoby. Energetickou kontrolou rádiového spoje, výpočtem maximálního dosahu vysílače a výpočtem minimálního potřebného výkonu vysílače.

Energetická kontrola rádiového spoje vychází ze základních technických parametrů zařízení. Pomocí matematických výpočtů se zjišťuje, jestli realizovaný rádiový spoj má větší odstup užitečného signálu od šumů než je minimální poměr signálu od šumů, který je uveden v technických parametrech. Pokud podmínka odstupu užitečného signálu od šumů není splněna, je potřeba rádiový spoj přemístit do místa, kde do cesty rádiového signálu nezasahují žádné překážky (zástavba, lesy, hory). Dále je potřeba zvýšit vysílací a přijímací antény do takové výšky, aby nestínily v průchodu rádiové vlny. Nakonec je potřeba zvýšit výkon vysílače. [3]

Výpočtem maximálního dosahu vysílačem se zjišťuje, v jaké vzdálenosti je možné zachytit rádiový signál přijímačem. Tento výpočet je závislý na výkonu vysílače. Podmínkou pro zrealizování rádiového spojení je, že intenzita elektrického pole v místě příjmu je větší jak 2  $\mu\text{V}$  na metr. Při nesplnění této podmínky je potřeba zvýšit výkon vysílače a zrealizovat rádiové spojení na kratší vzdálenost než bylo původně v plánu. [3]

Výpočtem minimálního potřebného výkonu vysílače se zjišťuje, jestli výkon radiových stanic je dostatečný pro uskutečnění rádiového spojení na stanovenou vzdálenost. Pokud tato podmínka není splněna, je potřeba zrealizovat rádiové spojení na kratší vzdálenost než bylo v plánu. [3]

Elektromagnetické (radiové) vlny se dělí podle frekvence a vlnové délky. Následující tabulka popisuje jednotlivé rozdělení radiových vln:

Tabulka 1.1: *Rozdělení radiových vln*

Mezinárodní zkratka	Frekvence	Vlnová délka
ELF (extremně dlouhé vlny)	3 Hz - 3 kHz	100 km - 1000 km
VLF (velmi dlouhé vlny)	3 kHz - 30 kHz	10 km - 100 km
LF (dlouhé vlny)	30 kHz - 300 kHz	1 km - 10 km
MF (střední vlny)	300 kHz - 3 MHz	100 m - 1 km
HF (krátké vlny)	3 MHz - 30 MHz	10 m - 100 m
VHF (velmi krátké vlny)	30 MHz - 300 MHz	1 m - 10 m
UHF (ultra krátké vlny)	300 MHz - 3 GHz	10 cm - 1 m
SHF (mikro vlny)	3 GHz - 30 GHz	1 cm - 10 cm
EHF (milimetrové vlny)	30 GHz - 300 GHz	1 mm - 1 cm

- **Velmi dlouhé a dlouhé vlny**

Velmi dlouhé vlny odrazem od ionosféry dosahují velkých vzdáleností (10 000 km). Mají dobrou schopnost ohybu okolo překážek.

Dlouhé vlny se snadno ohýbají, díky tomu snadno překonávají velké vzdálenosti přes různé překážky. Vzdálenost signálu je ovlivněna členitostí terénu, jako jsou zástavby, lesy, hory apod. Dlouhé vlny dosahují větší vzdálenosti, když se signál šíří nad hladinou než nad pevninou. Signál mezi vysílačem a přijímačem se šíří prostřednictvím prostorové a přízemní vlny. Šíření dlouhých vln není závislé na sluneční činnosti. Vlny mohou být ovlivňovány různými průmyslovými frekvencemi a atmosférickými vlivy. [9] [12]

V pásmu velmi dlouhých vln se často vyskytují rádiové poruchy. Rádiové poruchy se dělí na atmosférické, galaktické, tepelné, průmyslové a poruchy slunečního původu.

Velmi dlouhé a dlouhé vlny se pohybují na velmi nízkých frekvencích (3kHz – 300kHz) a využívají se například pro komunikaci s ponorkami, komunikaci v dolech nebo také pro bezdrátové měřiče pulsu. Dlouhé vlny se využívají pro pokrytí rozsáhlých území radiovým signálem (rozhlas, radiokomunikace, amplitudová modulace).

- **Střední vlny**

Střední vlny mají menší dosah a menší rušení než vlny dlouhé (100 m - 1 km). Šíření vln je ovlivňováno slunečním zářením. Střední vlny se šíří přízemní a prostorovou vlnou, kdy přízemní vlna má menší dosah než vlna prostorová. Prostorová vlna dosahuje nejsilnějšího dosahu v noci. Střední vlny se používají v rozhlasu a pro amplitudovou modulaci, která slouží

pro přenos zvukového signálu. Střední vlny v místě příjmu kolísají a dochází k jejich úniku. [9][12]

- **Krátké vlny**

Kvalita signálu v pásmu krátkých vln je ovlivňována vlastnostmi ionosféry. Signál v pásmu krátkých vln se šíří prostorovou a přízemní vlnou. Při odrazu vlny od ionosféry vzniká u přenosů krátkých vln tzv. „hluché pásmo“, ve kterém nedochází k příjmu signálu. Přízemní vlna v pásmu krátkých vln je silně tlumena zemí, dosahuje vzdáleností do 30 kilometrů. Prostorová vlna odrážející se od země se lomí a odráží se od ionosféry zpět k povrchu. Díky toho prostorová vlna dosahuje větších vzdáleností než vlna přízemní. [9][12]

Krátké vlny se pohybují na vysokých frekvencích (3-30 MHz) a využívají se například pro krátkovlnné vysílání.

- **Velmi krátké a ultra krátké vlny**

Velmi krátké vlny se neodráží od ionosféry a jsou tlumeny zemským povrchem. Přenáší se pomocí povrchové přímé vlny. Příjem těchto vln je omezen pouze na přímou viditelnost. Proto je důležité, aby antény vysílače a přijímače byli umístěny co nejvýše. V pásmu velmi krátkých vln vznikají tzv. překážkou odstíněná místa, kde je příjem signálu zhoršený. Překážkou odstíněná místa vznikají, když prostorově přímá vlna se od překážky neodrazí a pouze dojde k ohybu vlny. Velmi krátké vlny se pohybují ve velmi velkých frekvencích (30-300 MHz). Tyto vlny se používají pro frekvenční modulaci a také pro rozhlasový a televizní přenos. Televizní příjem je ovlivněn překážkami, od kterých se vlny odrážejí. V blízkosti vysílače je vlivem překážek příjem signálů špatný. [9][12]

Výhody velmi krátkých vln:

- vlny se méně odrážejí od ionosféry, lépe pronikají prostorem
- vlny se dobře odrážejí od vodivých předmětů
- vlny se šíří přímočaře a málo se ohýbají kolem země
- značná směrovost antén [9][12]

Ultra krátké vlny procházejí ionosférou a pohybují se v ultra vysokých frekvencích (300 MHz – 3 GHz). Využívají se pro radiolokace, televizní pásma, kosmické spoje a pro bezdrátovou a mobilní komunikaci. V tomto pásmu se signál šíří nejčastěji přímou vlnou.

- **Decimetrové vlny**

V současnosti se nejvíce používá komunikace v kmitočtovém pásmu UHF (Ultra krátké vlny), a to z důvodu velmi vhodných vlastností elektromagnetických vln v tomto pásmu. Mezi tyto vlastnosti patří malé ztráty šířením, dobrý ohyb a odraz, pronikání vln překážkami v zástavbě. Decimetrové vlny využívají mobilní zařízení a různé typy antén (malé antény). [1]

- **Centimetrové vlny**

Centimetrové vlny se podobají vlastnostem šíření světla. Šíření vln je silně ovlivněno překážkami (zástavba, lesní porost) a počasím (mlha, déšť). Centimetrové vlny se používají pro družicovou telekomunikaci, rozhlasový a televizní přenos. Centimetrové vlny jsou také využívány různými radary a k přenosu dat bezdrátovými sítěmi (WiMAX, Wi-Fi). [12]

- **Milimetrové vlny**

Milimetrové vlny se pohybují v extrémně vysokých frekvencích (30 – 300 GHz). Tyto vlny se využívají pro leteckou komunikaci (navigaci) a pro mikrovlnný přenos dat.

## 1.2 Způsoby šíření elektromagnetického signálu v prostoru

Šíření radiových vln je ovlivňováno následujícími vlastnostmi: [13]

- úbytek intenzity signálu se vzdáleností vlivem ředění přenášené energie
- útlum na mikroskopických nečistotách vzduchu
- zakřivení země
- interference stejného signálu vlivem jeho vícecestného šíření
- přímá viditelnost mezi anténami
- meteorologické podmínky
- magnetické pole země
- denní a noční doba
- interference signálů z různých zdrojů

Atmosférický lom (refrakce) vzniká při přechodu elektromagnetického signálu z jednoho do druhého prostředí.

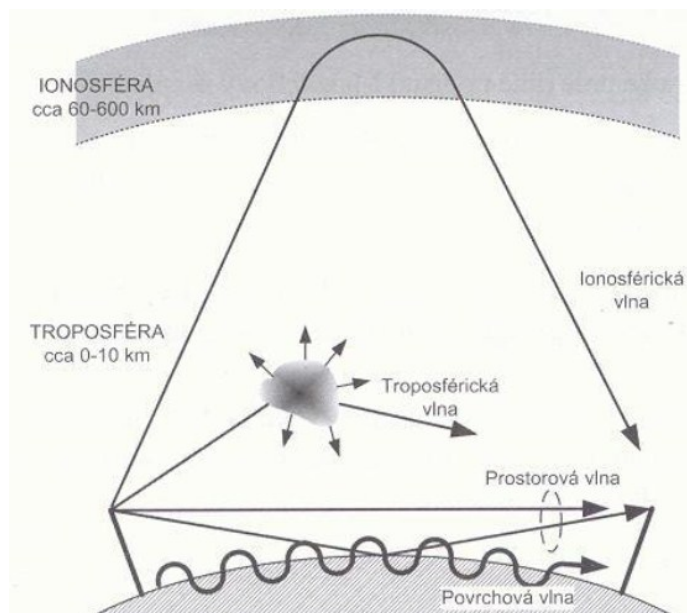
Pojem difrakce znamená ohýbání radiových vln kolem různých zakřivených překážek. Jedná se o přírodní překážky (lesy, hory, zemský povrch) a o umělé překážky (zástavba). Čím delší je délka šířené vlny, tím lepší je její ohyb nad překážkou. [13]

Jednotlivé způsoby šíření elektromagnetických vln se vybírají podle kmitočtu spojení, délky trasy vysílání, druhu a umístění antény, vlastností zemského povrchu a ionosféry.

Elektromagnetické vlny se šíří v zemské atmosféře, která se dělí na několik vrstev, které jsou znázorněné v následujícím obrázku (obr. 1.8):

- troposféra (0 – 11km)
- stratosféra (11 – 60km)
- ionosféra (60 – 600km)

- exosféra (nad 600km)



Obrázek 1.8: Mechanismy šíření elektromagnetických vln [10]

Více o jednotlivých vrstvách zemské atmosféry viz.[9]

Šíření elektromagnetické vlny můžeme rozlišovat na čtyři způsoby:

- **Šíření prostorově přímou vlnou**

Jedná se o šíření dolními vrstvami troposféry mezi přijímačem a vysílačem (přijímací, vysílací anténa). Šíření signálu tudíž není ovlivněno zemi ani ionosférou. Přímá vlna se šíří prostředím přímočaře. Šíření prostorově přímou vlnou se používá mezi vysílačem a přijímačem, mezi kterými je přímá viditelnost. Přímá vlna se neohýbá.

Do prvního způsobu šíření elektromagnetické vlny patří také vlna prostorově odražená (odraz od povrchu země). Intenzity pole (E, H) odražené a přímé vlny se sčítají do intenzity pole prostorové vlny.

První způsob šíření elektromagnetických vln je typický pro spojení na velmi vysokých kmitočtech (GHz a více). Tento způsob šíření je pro pásmo metrových a decimetrových vln na krátkých trasách (televizní signál). Pro využití šíření prostorově přímou vlnou je potřeba umístění antén ve vysokých výškách (antény na stožárech).[9]

- **Šíření povrchovou (přízemní) vlnou**

Jedná se o šíření v bezprostřední blízkosti povrchu země. Povrchová vlna sleduje zemský povrch a podle povrchu země se ohýbá (obr. 1.9). U velmi krátkých vln tvoří povrch země dokonalé zrcadlo a dochází k odrazu signálu od země. Intenzita vlny je závislá na elektrických vlastnostech půdy. Zemský povrch je z 70% pokryt vodou. Intenzita vlny je závislá na vlastnostech vody, je podstatný rozdíl mezi vodou slanou a sladkou. Dále se zemský povrch

dělí na vlhkou zemi a suchou zemi. Vlhká země je území s porostem, suchá země jsou skalnaté hory a pouště. Na rozdíl od prvního způsobu (šíření prostorově přímou vlnou) šíření vln spojení probíhá na nízkých kmitočtech (MHz). Povrchová vlna se z důvodu pohlcování energie povrchem země používá na krátké vzdálenosti (cca 10 km). [9]



Obrázek 1.9: Šíření přízemní elektromagnetickou vlnou [14]

### • Šíření ionosférickou vlnou

Jedná se o šíření odrazem od vrstvy ionosféry. Ionosféra je ionizovaná část atmosféry, která je složena z neutrálního plynu, iontů a elektronů. Největším zdrojem ionizace zemské atmosféry je záření slunce. Dalším zdrojem ionizace je záření hvězd a kosmické paprsky.

Ionosféra se dělí na čtyři vrstvy:

- vrstva D: jen v denních hodinách. Po západu slunce se vrstva D neutralizuje (zmizí zdroj ionizace)
- vrstva E: je charakterizována velkou stálostí svých vlastností
- vrstva F: v denních hodinách se dělí se na vrstvy F1 a F2. Po západu slunce vrstvy F1 a F2 splynou v jedinou vrstvu.

Dráhy elektromagnetických vln se v ionosféře zakřivují a vrací se zpět k zemi. Frekvence vlny, úhel dopadu na ionosféru a momentální stav ionosféry jsou vlastnosti, které rozhodují, zda se vlna odrazí, utlumí nebo ionosférou projde. Tento způsob šíření vln se používá pro velmi velké vzdálenosti. Vzájemnými odrazy vln od země a ionosféry signál dosáhne jakéhokoli místa na Zemi. Tento způsob šíření je typický pro krátkovlnné dálkové spoje (stovky a tisíce kilometrů). Odraz signálu od ionosféry u rozhlasového příjmu může způsobovat postupné zesilování a zeslabování příjmu. [9]

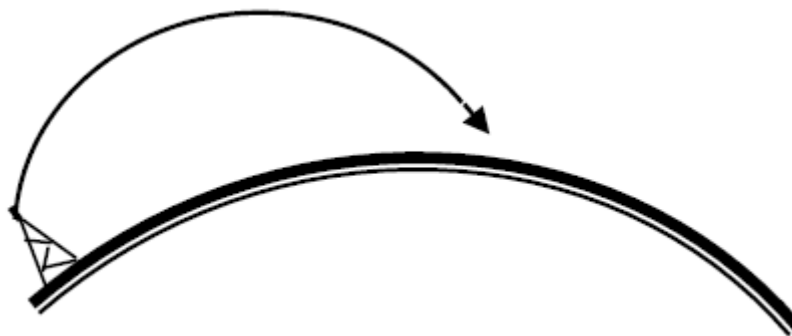
### • Šíření troposférickým rozptylem

Jedná se o šíření na nehomogenitách atmosféry, kdy homogenity rozptylují dané vlnění a lze tak dosáhnout velké vzdálenosti signálu (obr. 1.10). Na nehomogenitách v atmosféře dochází také k útlumu radiových absorpcí nebo k vícecestnému šíření. Troposféra je spodní část atmosféry, kde probíhají různé meteorologické jevy. Šíření radiových vln v troposféře je závislé na parametrech troposféry, jako jsou teplota, vlhkost a tlak. S narůstající výškou klesá teplota troposféry. [15]

Odraz signálu od troposféry závisí na:

- výšce troposférických vrstev
- tloušťce troposférických vrstev
- rozdílnosti prostředí

Šíření troposférickým rozptylem se používá v pásmu decimetrových vln pro spojení na střední vzdálenosti. Pro využití šíření troposférickým rozptylem jsou zapotřebí přesně směřované antény a velké výkony vysílačů. [9]



Obrázek 1.10: Šíření rádiových vln troposférickou vlnou [14]

Více o způsobech šíření elektromagnetických vln viz [9]

### • Únik signálu (Fading efekt)

Další způsob šíření elektromagnetického signálu v prostoru je pomocí mobilního spoje. U mobilního spoje jsou vysílací a přijímací antény stále v pohybu (mobilní telefony, PDA zařízení, bezdrátové připojení na internet apod.). Šíření signálu mezi pevnou a mobilní anténou v zástavbě je tlumeno fyzikálními mechanismy, a tak dochází k únikům signálu (obr. 1. 11.). [1]

Únik signálu (fading) vzniká, když více elektromagnetických vln dorazí současně do místa příjmu (přijímač). Únik signálu má za následek kolísání síly přijímaného signálu během určitého časového úseku. Únik signálu na středních vlnách nejčastěji způsobují vlny prostorové a přízemní. Únik signálu na velmi krátkých vlnách způsobují vlny odražené a přímé. [14]

Úniky signálu se dělí na úniky, které jsou závislé na kmitočtu spoje a na umístění antén (interferenční úniky) a na úniky, které jsou způsobeny vícecestným šířením signálu.

Úniky signálu se dále dělí na pomalé úniky a rychle úniky. Rozdíl mezi jednotlivými druhy úniků signálu je v četnosti změn amplitudy přijímaného výkonu.

Pomalé úniky mají periodu amplitudových změn několik hodin. Pomalé úniky jsou závislé na zastínění daného spojení (zástavba, vegetace). Jestliže se mezi vysílací a přijímací anténou nacházejí velké stínící překážky (vůči vlnové délce vlny), úroveň signálu je závislá na

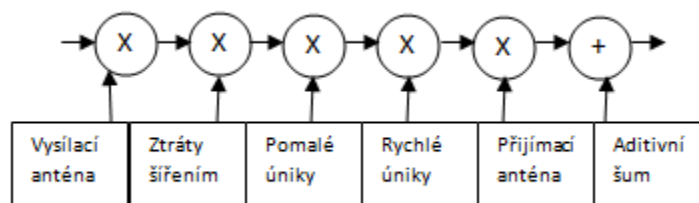


ohybu a na rozptylu rádiových vln způsobených těmito překážkami. Rozdíl mezi jednotlivými úrovněmi signálu je ve většině případů nevýrazný.

Rychle úniky mají periodu amplitudových změn od jedné vteřiny do několika minut. Rychle úniky jsou způsobeny vícecestným šířením rádiového signálu. Vícecestné šíření signálu je popsáno v dalších částech diplomové práce.

Při přenosu rádiového signálu na přímou viditelnost mezi vysílací a přijímací stranou dochází k pomalým změnám mezi úrovněmi přijímaného signálu (pomalé úniky signálu). Pomalé změny jsou obvykle spojeny se změnami atmosférické refrakce, což způsobuje zvětšování efektivního poloměru země a zastínění části Fresnelovy zóny terénem.

Při přenosu rádiového signálu na velkou vzdálenost mezi vysílací a přijímací stranou (kmitočty 8-10 GHz), dochází k nadměrnému útlumu signálu s periodou několik minut. Nadměrný útlum signálu mohou způsobovat například dešťové srážky. [14] [29]



Obrázek 1.11: *Mechanismus modelování výkonové bilance rádiového přenosu v zástavbě [1]*

U vysílací a přijímací antény se při výpočtu úrovně přijímaného signálu používá zisk antén.

Ztráty šířením jsou závislé na vzdálenosti komunikace a na typu prostředí.

Aditivní šum je způsoben šumem přijímače a různými nežádoucími vlivy v okolí daného spojení. [14]

- **Dopplerův jev**

Tento jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného signálu oproti vysílanému. Dopplerův jev je způsoben nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Dopplerův jev vzniká, když vysílač a přijímač jsou ve vzájemném pohybu. [16]

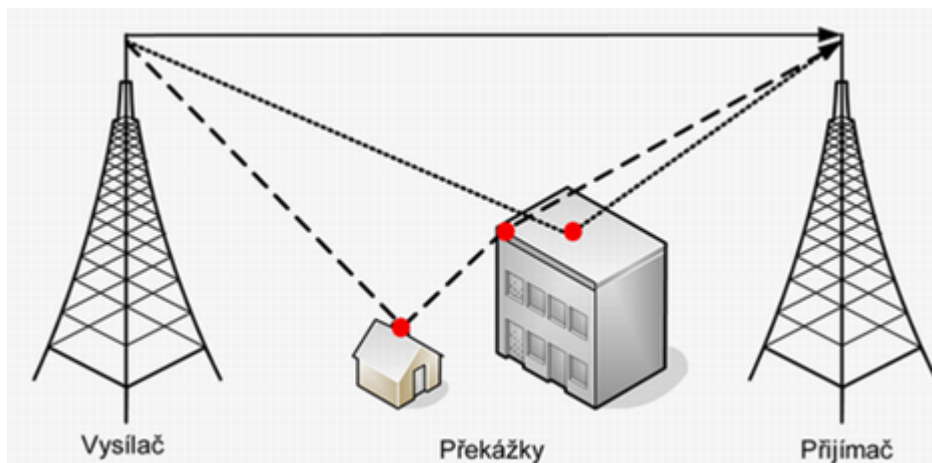
Více o Dopplerově jevu se lze dočíst v literatuře [16].

- **Vícecestné šíření elektromagnetického signálu**

Rychlé úniky jsou způsobeny Dopplerovým posunem (pohyb mobilní antény). Hodnota úniků signálu je zjištěna zprůměrováním velkého počtu měření velikosti úrovně signálu. Rychlé úniky jsou způsobeny také vícecestným (mnohocestným) šířením signálu (obr. 1.12), které vzniká odrazem elektromagnetické vlny od překážek či od země v okolí přijímače (obr. 1.12).

Vícecestné šíření vzniká v důsledku velkého množství elektromagnetických vln, které přicházejí po různě dlouhých dráhách z různých směrů z daného vysílače. U odražených vln dochází ke zpoždění. Všechny elektromagnetické vlny se v přijímací anténě vektorově sčítají, což způsobuje kolísání úrovně přijímaného signálu. Rozdíl mezi jednotlivými úrovněmi signálu je značný.

Když mezi vysílačem a přijímačem není zajištěna přímá optická viditelnost, lze realizovat spojení mezi vysílačem a přijímačem pomocí odrazů, ohybů a rozptylů signálů. [1]

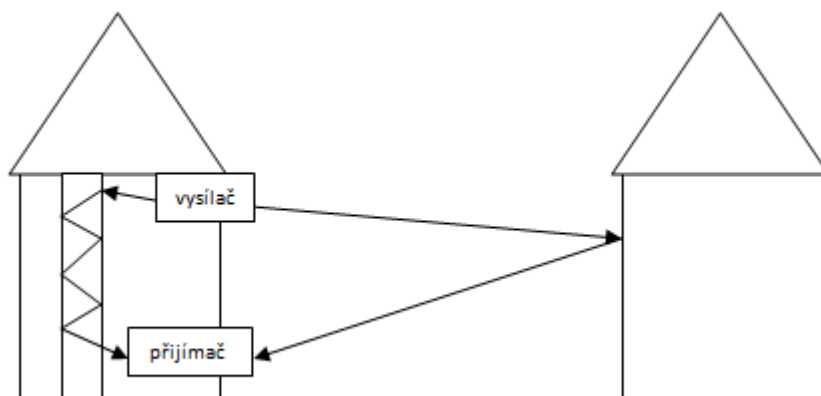


Obrázek 1.12: *Princip vícecestného šíření signálu [17]*

### 1.3 Modely šíření elektromagnetického signálu v zástavbě

Šíření signálu v zástavbě je nejkomplikovanější způsob šíření signálu. Elektromagnetický signál v zástavbě prochází přes zdi a je různě ovlivněn danou situací v zástavbě (otevřené dveře a okna apod.). Signál v zástavbě se odráží od protějších budov a různých překážek. Signál se může šířit výtahovou šachtou jako ve vlnovodu. [1]

Na obrázku (obr. 1.13) jsou popsány cesty šíření elektromagnetického signálu v zástavbě. Vysílač vysílá signál, který prochází oknem první budovy a odráží se od sousední budovy.



Obrázek 1.13: Šíření elektromagnetického signálu v zástavbě

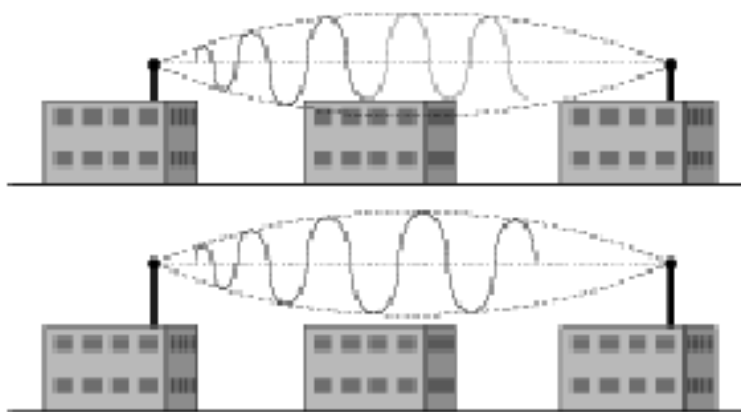
Šíření signálu v zástavbě je závislé na typu okolního prostředí a na umístění pevné základnové antény. Dále se šíření signálu dělí podle charakteru výpočtu daného modelu.

- **Fresnelova zóna**

Fresnelova zóna je elipsoid kolem prostoru, kde se šíří signál mezi vysílačem a přijímačem. Pro kvalitnější přenos signálu by do tohoto elipsoidu neměla zasahovat žádná překážka (lesy, zástavba).

Na obrázku (obr. 1.14) jsou znázorněny dvě Fresnelovy zóny. První zóna je zastíněna prostřední budovou. Druhá zóna je bez zastínění. Zásah signálu do Fresnelovy zóny způsobuje jeho útlum.

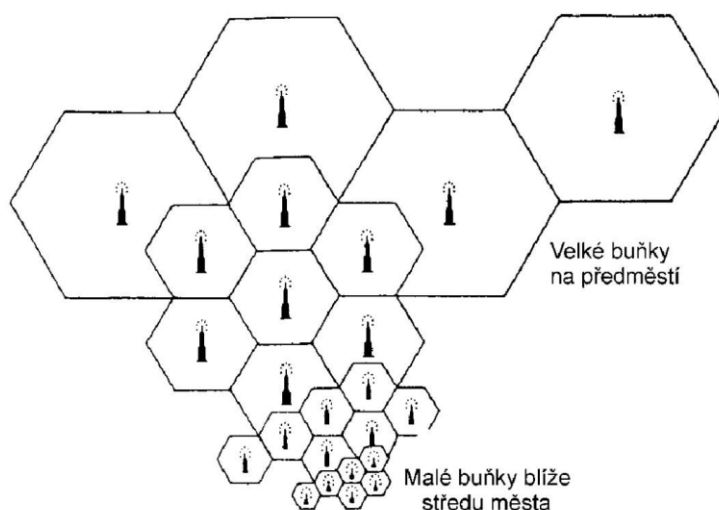
Více o Fresnelových zónách se lze dočíst v literatuře [1]



Obrázek 1.14: Znázornění Fresnelovy zóny [1]

- **Celulární (buňková) struktura rádiového spojení**

Celulární struktura rádiového spojení rozděluje území na buňky, které tvoří velký počet malých území (obr. 1.15). Základnová převodní stanice (BTS, Base Transceiver Station) je vysílač a přijímač radiových signálů. Zajišťuje spojení mobilních účastníků v dané buňce se systémem. Systém základnových stanic (BSS, Base Station S(ubs)ystem) provádí překódování hovorových kanálů a přidělování radiových kanálů mobilním telefonům. Jednotlivé buňky mají různou velikost. Velikost buňky je závislá na terénu, hustotě provozu a na počtu účastníků v dané buňce. [18]



Obrázek 1.15: Městská celulární síť [18]

Typ okolního prostředí a umístění pevné antény jsou určeny typem buňky: (obr. 1.16)

- **Makrobuňka (poloměr buňky: 1 až 30 km):**

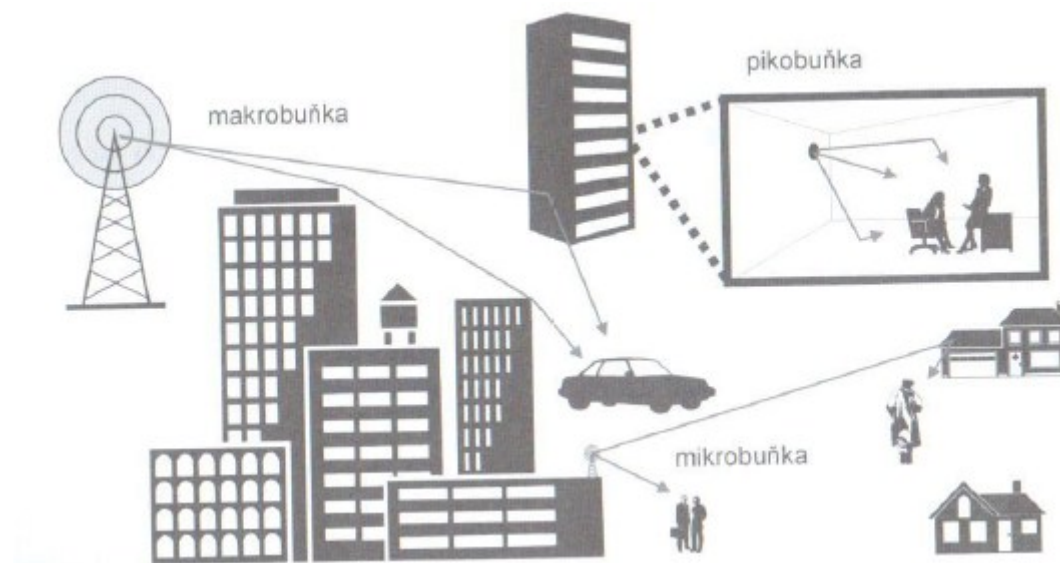
Pevná základnová anténa je umístěná nad úrovní střech zástavby. Mobilní anténa je umístěna na dané ulici. Mezi přijímačem a vysílačem není přímá viditelná vzdálenost. Nejčastěji dochází k ohybu na hranách střech a odrazům od objektů v blízkosti mobilní antény. Z důvodu nepravidelnosti zástavby má makrobuňka kruhový tvar. [1]

- **Mikrobuňka (poloměr buňky: 100 až 1000 m):**

Pevná základnová anténa je umístěna pod úrovní okolních střech zástavby (3 až 6 m nad zemí). Mezi přijímačem a vysílačem je přímá viditelná vzdálenost. Nejčastěji dochází k odrazům od stěn budov. Mikrobuňka nemá kruhový tvar. Tvar mikrobuňky sleduje konkrétní geometrii zástavby. [1]

○ **Pikobuňka (rozměry pikobuňky: 1 až 10 m):**

Pevná základnová anténa je v uzavřeném interiéru (kancelářské budovy, nákupní centrum apod.). Nejčastěji dochází k ohybům, odrazům a průchodům signálů stěnami. Signál se šíří mezi jednotlivými patry pomocí odrazy signálů od oken vedlejších budov. Díky různé členitosti interiéru představuje pikobuňka nejkomplikovanější případ. Pikobuňka oproti mikrobuňce má pravidelnější tvar, jelikož signál dobře prochází různými překážkami v interiéru. [1]



Obrázek 1.16: Šíření elektromagnetické vlny v zástavbě [1]

Kromě dělení podle typu buňky dělíme také šíření elektromagnetického signálu v zástavbě podle charakteru výpočtu, pomocí kterého ke konkrétnímu modelu šíření vln v zástavbě dospějeme.

Modely se používají pro teoretickou simulaci šíření elektromagnetického signálu v zástavbě, v uzavřeném prostoru nebo také v tunelu. Modely se dělí podle jejich výpočtu a použití. V další části jsou popsány základní modely, které se používají pro teoretickou simulaci šíření elektromagnetického signálu v zástavbě. [1]

• **Empirické modely**

Empirické modely jsou nejpoužívanější, jelikož mají jednoduché a rychlé výpočty pro daný typ prostředí. Pomocí vztahu pro výpočet Empirického modelu, se porovnávají naměřené a vypočtené hodnoty přijímaných výkonů nebo útlumů. Díky velkému počtu měření je zaručena přesnost výpočtu. Empirické modely nejsou závislé na rozložení a velikosti překážek. [1]

Nejpoužívanější empirické modely pro šíření elektromagnetického signálu v zástavbě: [1]

○ **Základní empirický model „1/d“**

Tento model lze použít v prostředí, kde útlum narůstá s příslušnou mocninou vzdálenosti. Většina empirických modelů vychází ze základního empirického modelu „1/d“.

Základní empirický model má velmi rychlý výpočet. Výpočet tohoto modelu neřeší konkrétní geometrickou situaci prostředí. Proto má tento model pouze orientační výsledky. [1]

Výpočet pro Základní empirický model:

$$L(d) = L_1 + 10n \log \left( \frac{d}{d_1} \right) \quad (1.3)$$

$L$  (dB) – ztráty šířením

$d$  (m) – vzdálenost od vysílací antény

$d_1$  (m) – referenční vzdálenost

$L_1$  (dB) – referenční útlum pro referenční vzdálenost  $d_1$

$n$  (-) – spádový koeficient (rychlost nárůstu ztrát šířením se vzdáleností)

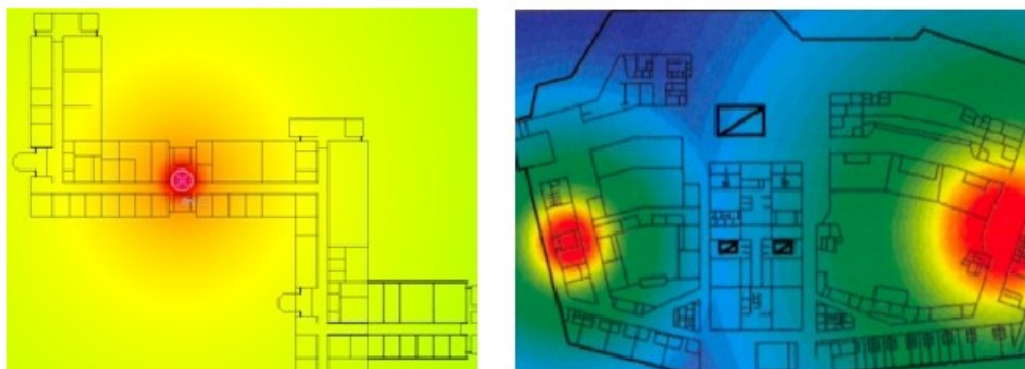
Hodnoty parametru  $L_1$  a  $n$ , jsou získány díky velkému počtu měření v daných prostředích.

Tabulka 1.2: *Typické hodnoty spádového koeficientu  $n$  pro empirický model šíření [1]*

<b>n</b>	<b>Prostředí</b>
2	volný prostor
2,5-4	městská zástavba
3-5	hustá městská zástavba
1,6-1,8	uvnitř budov – přímá optická viditelnost
3-6	uvnitř budov – zastínění

### 1.3.1 ONE-SLOPE model

ONE-SLOPE model (obr. 1.17) je základní empirický model v pikobuňkách. Je ideální pro rychlé predikce v interiéru (jednoduché, rychlé výpočty). Výsledky tohoto modelu jsou spíše orientační. Rozdíl naměřených hodnot od vypočítaných hodnot se pohybuje kolem 10 dB.



Obrázek 1.17: Šíření signálu prostorem „one slope modelu“ [1]

Výpočet pro ONE-SLOPE model:

$$L(d) = L_1 + 10n\log(d) \quad (1.4)$$

$L$  (dB) – ztráty šířením

$d$  (m) – vzdálenost mezi vysílací anténou a bodem pozorování

$L_1$  (dB) – referenční hodnota ztrát pro vzdálenost 1m

$n$  (-) – spádový koeficient (rychlost nárůstu ztrát šířením se vzdáleností).

Hodnoty parametru  $L_1$  (dB) a  $n$  jsou získány pomocí velkého počtu měření v daných prostředích.

Spádový koeficient popisuje rychlost nárůstu ztrát šířením se vzrůstající vzdáleností. Pokud mezi vysílací anténou a přijímací anténou je přímá viditelnost, spádový koeficient  $n = 2$ . V případě, kdy mezi vysílací anténou a přijímací anténou je členitý interiér, spádový koeficient  $n = 4$ . Při šíření signálu mezi podlažími je možné přičíst další aditivní ztráty za každé podlaží. Aditivní ztráty se pohybují v intervalu 6-25 dB. [1]

Následující tabulka (tab. 1.3) popisuje Empirické parametry pro One-Slope Model.

Tabulka 1.3: *Empirické parametry pro One-slope Model a různá frekvenční pásma f [1]*

<b>f [GHz]</b>	<b>Prostředí</b>	<b>L1 [dB]</b>	<b>n</b>	<b>Příklad</b>
1,8	kanceláře	33,3	4	GSM 1800
1,8	otevřené prostory	37,5	2	GSM 1800
1,8	chodba	39,2	1,4	GSM 1800
1,9	kanceláře	38	4	DECT
1,9	otevřené prostory	38	2,1	DECT
1,9	chodba	38	1,3	DECT
2,5	kanceláře	40,2	4,2	WLAN 802.11 b/g
2,5	chodba	40,2	1,2	WLAN 802.11 b/g
1,8	kanceláře	33,3		

### 1.3.2 DUAL-SLOPE model

Tento model je určen pro mikrobuňky. Využívá se pro přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Zahrnuje výpočty pro Fresnelovy zlomy. Fresnelův zlom probíhá v místě, kde dráhový rozdíl přímého a odraženého paprsku je roven právě polovině vlnové délky. Fresnelův zlom se objevuje při malých výškách antén. [1]

Výpočet pro DUAL-SLOPE model:

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log * d \quad d < d_0 \quad (1.5)$$

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log * d_0 + 10n_2 \log * \frac{d}{d_0} \quad d > d_0$$

$L(d)$  (dB) – střední hodnota ztrát šířením

$d$  (m) – vzdálenost

$d_0$  (m) – bod zlomu (Fresnelův zlom)

$L_1$  (dB) – referenční hodnota ztrát pro vzdálenost 1m

$n_1$  (-) – spádový koeficient pro  $d < d_0$  ( $n_1 = 2$ )

$n_2$  (-) – spádový koeficient pro  $d > d_0$  ( $n_2 = 4$ )



$$d_0 = \frac{h_1 * h_2}{\lambda}$$

$h_1, h_2$  (m) – výšky antén spoje

$\lambda$  (m) – vlnová délka

### 1.3.3 HATŮV model

Hatův model je nejstarší model pro šíření signálu v zástavbě. Je určen pro makrobuňky. Tento model je odvozen z mnoha měření ve velkých městech.

Výpočet pro Hatův model:

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log * d \quad (1.6)$$

$$n = \frac{4,49 - 6,55 \log h_b}{10}$$

$$L_1 = C_1 + C_2 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + C_0$$

$L(d)$  (dB) – střední hodnota ztrát šířením

$d$  (km) – vzdálenost

$f$  (MHz) - kmitočet

$h_b$  (m) – výška pevné antény

$h_m$  (m) – výška mobilní antény

$C_0$  – koeficient pro různou hustotu městských zástaveb

$C_1, C_2, a_{hm}$  – koeficient pro různé frekvenční rozsahy

Podmínkou tohoto modelu je, že výška pevné antény musí být větší než okolní zástavba. Další podmínkou tohoto modelu jsou následující limity:

$$150 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} < h_b < 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m}$$

$$1 \text{ km} < d < 20 \text{ km}$$

### 1.3.4 BERGŮV REKURZIVNÍ MODEL

Tento model je určen pro mikrobuňky. Využívá se v případě, kdy jsou antény umístěné pod úrovní střech. Pro konkrétní členění zástavby model potřebuje 2D plán zástavby. Výpočty tohoto modelu jsou rozděleny na tři části. První část výpočtu obnáší najít nejkratší spojnici mezi vysílací a přijímací stranou. Druhá část zahrnuje výpočty pro zjištění fiktivní délky spojnice mezi vysílací a přijímací stranou. Fiktivní délka je delší než součet reálných délek mezi anténami. Třetí část zahrnuje výpočty pro zjištění ztráty šíření signálů (Dual slope model). [1]

První část výpočtu:

$$d_n = \sum_{j=1}^n r_{j-1} \quad (1.7)$$

$d_n$  (m) – délka spojnice z 0-tého do n-tého uzlu

$r_j$  (m) - délka segmentu mezi uzly  $j$  a  $j + 1$

Druhá část výpočtu, výpočet pro fiktivní délky lomené spojnice mezi pevnou anténou (uzlem  $j = 0$ ) a  $j$ -tým uzlem ( $j > 0$ ), je dána následujícími rekurzivními vztahy:

$$k_j = k_{j-1} + D_{j-1} \left( \frac{\theta_j * q}{90} \right)^v \quad (1.8)$$

$$D_j = k_j r_{j-1} + D_{j-1}$$

$$k_0 = 1$$

$$D_0 = 0$$

$D_j$  (m) – fiktivní délka spojnice z počátku (od pevné antény do  $j$ -tého uzlu)

$r_j$  (m) – délka segmentu mezi uzly s indexy  $j$  a  $j+1$

$\theta_j$  (°) – úhel změny směru spojnice v  $j$ -tém uzlu

$q$  (-) – empirický parametr modelu, doporučená hodnota  $q = 0,5$

$v$  (-) – empirický parametr modelu, doporučená hodnota  $v = 1,5$

Třetí část výpočtu zahrnuje výpočty pro klasický Dual-slope model, který je použitý na fiktivní délku spoje se spádovými koeficienty 2 a 4. Výpočty jsou rozděleny na dvě části. První část zahrnuje výpočty pro vzdálenosti před a za Fresnelovým zlomem. [1]

Před Fresnelovým zlomem:

$$L = 20 \log \left( \frac{4 * \pi * D_N}{\lambda} \right) \quad d_N \leq d_0 \quad (1.9)$$

Za Fresnelovým zlomem:

$$L = 20 \log \left( \frac{4\pi * D_N * d_N}{\lambda * d_0} \right) \quad d_N > d_0$$

(1.10)

$$d_0 = \frac{4 * h_1 * h_2}{\lambda}$$

$L$  (dB) – celkové ztráty šířením

$N$  (-) – index posledního uzlu (v místě mobilní antény)

$D_N$  (m) – fiktivní délka do  $N$ -tého uzlu

$d_N$  (m) – skutečná délka lomené spojnice do  $N$ -tého uzlu

$d_0$  (m) – vzdálenost bodu zlomu (pro 2 GHz,  $d_0 = 300$  m)

$h_1$  (m) – výška antény daného spoje

$h_2$  (m) – výška antény daného spoje

$\lambda$  (m) – vlnová délka

### 1.3.5 LEE model

Tento model je určen pro makrobuňky. Parametry Lee modelu jsou optimalizovány pro frekvenční pásmo 800/900 MHz. Lee model umožňuje korekci pro nerovný terén. Z tohoto důvodu je potřeba konkrétní profil simulovaného terénu. [1]

Výpočet pro případ, kdy je mezi vysílací a přijímací anténou přímá viditelnost:

$$L(d) = L_1 + 10n \log * d - 20 \log \frac{h_{ef}}{h_b} \quad (1.11)$$

$L$  (dB) – ztráty šířením

$L_1$  (dB) – referenční útlum pro vzdálenost 1 m

$d$  (m) – vzdálenost od vysílače

$h_{ef}$  (m) – efektivní výška pevné antény

$h_b$  (m) – výška pevné antény

Tabulka 1.4: *Empirické parametry pro Lee model[1]*

Prostředí	L1 [dB]	n (-)
předměstí	104	3,84
otevřené prostory	91,3	4,35

Výpočet pro případ, kdy je trasa mezi vysílací a přijímací anténou zastíněna:

$$L(d) = L_1 + 10n\log d - 20\log \frac{h_{ef}}{h_b} + L_{dif} \quad (1.12)$$

$L$  (dB) – ztráty šířením

$L_1$  (dB) – referenční útlum pro vzdálenost 1 m

$L_{dif}$  (dB) – přidavné ztráty difrakcí na překážce

$d$  (m) – vzdálenost od vysílače

$h_{ef}$  (m) – efektivní výška pevné antény

$h_b$  (m) – výška pevné antény

Výpočet efektivní výšky antény:

$$v = h_p \sqrt{\frac{2 \cdot (d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} \quad (1.13)$$

$v$  – ztráty difrakci na překážce

pro  $v \geq 1$   $L = 0$

pro  $0 \leq v < 1$   $L = 20\log(0,5 + 0,62v)$

pro  $-1 \leq v < 0$   $L = 20\log(0,5e^{0,95v})$

pro  $-2,4 \leq v < -1$   $L = 20\log(0,4 - \sqrt{0,1184 - [0,1v + 0,1v + 0,38]^2})$

pro  $v < -2,4$   $L = 20\log(-\frac{0,225}{v})$

#### ○ ITU-R P.1238 model

Tento model je založen na modelu ONE-SLOPE. ONE-SLOPE zahrnuje výpočty pro šíření signálu mezi podlažími. Model má jednoduché výpočty, které jsou rozděleny na dvě části. První část jsou výpočty na přímou viditelnost. Druhá část jsou výpočty při zastínění. Výpočty

při zastínění jsou závislé na geometrickém rozložení budov základnových stanic. Tyto výpočty jsou dále závislé nad tím, kde se nachází mobilní uživatel v reálném čase. [1]

### ○ **ITU-R P.1411 model**

Tento model je určen pro mikrobuňky. Využívá se pro přímou i nepřímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem.

### • **Deterministické modely**

Deterministické modely jsou nejpřesnější. Modely jsou vytvořeny podle teoretických předpokladů a fyzikálních principů šíření elektromagnetických vln v zástavbě. Díky toho lze modelovat útlum šíření a širokopásmové parametry s velkou přesností. Pro co největší přesnost je potřeba co nejvíc naměřených vstupních dat, které mimo jiné obsahují přesnou definici měřeného prostoru. [1]

### 1.3.6 **OPTICKÉ modely**

Tyto modely vychází z teoretických předpokladů šíření rádiových vln. Modely zahrnují výpočty pro predikaci ztráty šířením. Pro tyto výpočty je potřeba dostatečné množství vstupních dat. [1]

Výpočet optického modelu je rozdělen na geometrickou a elektromagnetickou část. V první části výpočtu se vyhledají důležité paprsky, které se šíří mezi vysílací a přijímací anténou. Mezi důležité paprsky patří také paprsky, které se cestou k přijímači různě odráží od země a různých překážek. Důležité paprsky jsou takové, které do přijímací antény nesou určitou energii. Do první části výpočtu nepatří paprsky, které se mezi vysílací a přijímací částí mnohokrát odrazili nebo různě změnili (difrakce). Tyto paprsky mají zanedbatelnou velikost energie. [1]

Pro vyhledání důležitých paprsků existují dvě metody. Nejvíce používanou metodou pro sledování důležitých paprsků je metoda Ray tracing. Ray tracing pro vyhledávání všech paprsků používá zrcadlení. Druhá metoda používá pro vyhledávání paprsků techniku vystřelování paprsků, jedná se o metodu Ray launching. Ray launching na rozdíl od první metody nevyhledá všechny možné paprsky mezi vysílací a přijímací anténou. Metoda ray launching nerozezná všechny možné ohyby paprsků. [1]

Cílem elektromagnetické části výpočtu je sečíst energii všech příchozích paprsků.

Výpočty optických modelů jsou velmi náročné. Z tohoto důvodu jsou výpočty naprogramovány do různých plánovacích aplikací.

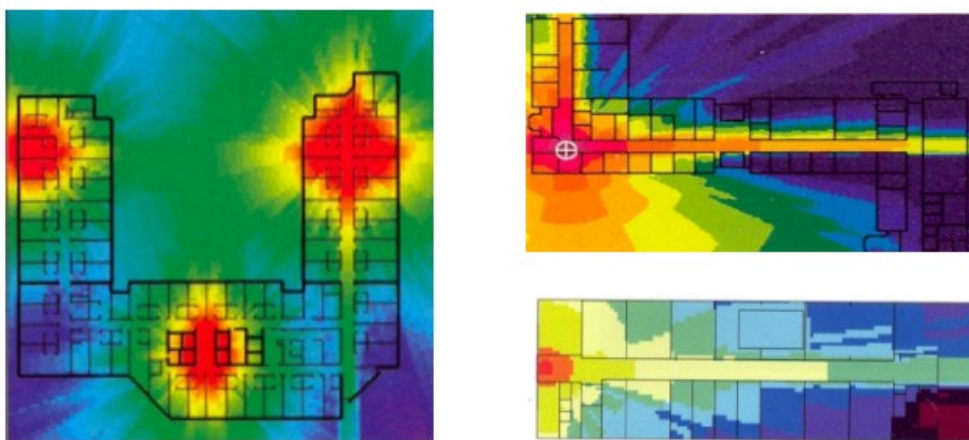
- **Semi-empirické modely**

Tyto modely jsou tvořeny kombinací empirických modelů a deterministických modelů.

Nejpoužívanější semi-empirické modely pro šíření elektromagnetického signálu v zástavbě: [1]

### 1.3.7 MULTI-WALL model

Tento model je určen pro pikobuňky (obr. 1.18). Zahrnuje výpočty pro konkrétní členění interiéru. Výpočty pro tento model jsou složitější než u předchozích modelů. Tento model potřebuje informace o rozmístění stěn, objektů a podobně na jednotlivých patrech. Multi-wall model nedokáže modelovat vlnovodný efekt v dlouhých zahýbajících chodbách. [1]



Obrázek 1.18: Šíření signálu pomocí „multi-wall modelu“ [1]

Výpočet pro MULTI-WALL model:

$$L(d) = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \sum_i k_{wi} * l_{wi} + k_f^{\left( \frac{k_f+2}{k_f+1} - b \right)} * L_f \quad (1.14)$$

$L(d)$  (dB) – celkový útlum

$d$  (m) – vzdálenost

$\lambda$  (m) – vlnová délka ( $\lambda = 300/f$  [MHz])

$k_{wi}$  (-) – počet příček typu  $i$ , které protíná spojnice vysílač – přijímač

$L_{wi}$  (dB) – činitel útlumu pro příčku typu  $i$

$k_f$  (-) – počet podlaží, která protíná spojnice vysílač – přijímač

$L_f$  (dB) – činitel útlumu pro průchod podlažím

$b$  (-) – konstanta nelinearity útlumu průchodem skrz více podlaží, implicitní hodnota  $b = 0,46$

Následující tabulka (tab. 1.5) popisuje doporučené parametry pro Multi-Wall Model.

Tabulka 1.5: *Multi-Wall Model – doporučené parametry [1]*

<b>f [GHz]</b>	<b>L1 [dB]</b>	<b>L2 [dB]</b>	<b>Lf [dB]</b>	<b>Příklad</b>
1,8	3,4	9,6	18,3	GSM 1800
1,9	2,1	4,4	13,6	DECT
12,5	5,9	8	-	WLAN 802.11 b/g

### 1.3.8 WALFISH-IKEGAMI model

Tento model je určen pro makrobuňky. Zahrnuje výpočty pro případy, kdy dochází k ohybům elektromagnetických signálů na hranách střech. Walfish-Ikegami model je také označován jako COST231 WI. [1]

Walfish-Ikegami model je omezen následovně:

$$800 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$$

$$4 \text{ m} < h_b < 50 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_m < 3 \text{ m}$$

$$200 \text{ m} < d < 5 \text{ km}$$

Před zahájením výpočtu Walfish-Ikegami modelu je nutné zjistit následující parametry zástavby:

$h_R$  (m) – výška identických bloků představujících pravidelnou zástavbu

$h_b$  (m) – výška pevné antény

$h_m$  (m) – výška mobilní antény

$b$  (m) – pravidelné odstupy mezi jednotlivými identickými bloky

$w$  (m) – šíře ulic mezi bloky

Výpočet pro případ, kdy je mezi vysílací a přijímací anténou přímá viditelnost:

$$L = 42,6 + 26\log d + 20\log f \quad (1.15)$$

$L$  (dB) – celkový střední útlum šířením

$d$  (km) – vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou ( $d > 20 \text{ m}$ )

$f$  (MHz) – frekvence

Výpočet pro případ, kdy je trasa mezi vysílací a přijímací anténou zastíněna:

$$L = FSL(d) + L_{msd} + L_{rts} \quad (1.16)$$

$FSL(d)$  (dB) – ztráty volným prostorem pro vzdálenost  $d$  (km)

$L_{msd}$  (dB) – ztráty způsobené mnohonásobnými ohyby vln na střechách budov mezi pevnou a mobilní anténou.

$L_{rts}$  (dB) – ztráty vzniklé ohyby signálů na hraně střech posledního bloku u mobilní antény.

Pro tyto ztráty platí podmínka: (1)

$$L_{msd} + L_{rts} < 0, \text{ je } L = FSL(d) \quad (1.17)$$

Výpočet pro ztráty, které jsou způsobené mnohonásobnými ohyby vln na střechách budov mezi pevnou a mobilní anténou: (1)

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (1.18)$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + h_b - h_R) \quad \text{pro } h_b > h_R$$

$$L_{bsh} = 0 \quad \text{pro } h_b \leq h_R$$

$$k_a = 54 \quad \text{pro } h_b > h_R$$

$$k_a = 54 - 0,8 * (h_b - h_R) \quad \text{pro } h_b > h_R \text{ a } d \geq 0,5 \text{ km}$$

$$k_a = 54 - 1,6 d * (h_b - h_R) \quad \text{pro } h_b \leq h_R \text{ a } d < 0,5 \text{ km}$$

$$k_d = 18 \quad \text{pro } h_b > h_R$$

$$k_d = 18 - \frac{15 * (h_b - h_R)}{h_R} \quad \text{pro } h_b \leq h_R$$

$$k_f = -4 + 0,7 * \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{pro předměstí a středně velká města}$$

$$k_f = -4 + 1,5 * \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{pro hustou zástavbu (velká města)}$$

Výpočet pro ztráty vzniklé ohyby signálů na hraně střech posledního bloku u mobilní antény: (1)

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h_R - h_m) + L_{ori} \quad (1.19)$$

$$L_{ori} = -10 + 0,354\varphi \quad \text{pro } 0^\circ < \varphi < 35^\circ$$



$$L_{\text{ori}} = 2,5 + 0,075 * (\varphi - 35) \quad \text{pro } 35^\circ < \varphi < 55^\circ$$

$$L_{\text{ori}} = 4 - 0,114 * (\varphi - 55) \quad \text{pro } 55^\circ < \varphi < 90^\circ$$

V případě, kdy nejsou známy přesné údaje o zástavbě, je možné pro vstupní parametry použít tyto hodnoty:

$$h_R = (3 \text{ m} * \text{počet podlaží}) + (3 \text{ m pro sedlové střechy, } 0 \text{ m pro rovné střechy})$$

$$20 \text{ m} < b < 50 \text{ m}$$

$$w = \frac{b}{2}$$

$$\varphi = 90^\circ$$

#### ○ COST231 modely k predikci úrovně signálu uvnitř budov

Výpočet tohoto modelu je rozdělen na dvě části. První část zahrnuje výpočty pro přímou viditelnost mezi vysílací a přijímací anténou. Druhá část zahrnuje výpočty při zastínění mezi vysílací a přijímací anténou. [1]

Výpočet COST231 modelu k predikci úrovně signálu uvnitř budov pro přímou viditelnost mezi vysílací a přijímací anténou: (1)

$$L = 32,4 + 20 \log f + 20 \log(S + d) + W_e + W G_e + \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2 + \max(\Gamma_1, \Gamma_2) \quad (1.20)$$

$$\Gamma_1 = W_i p$$

$$\Gamma_2 = \alpha * (d - 2) * \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2$$

L (dB) – střední hodnota ztrát šířením

d (m) – vzdálenost od obou antén k obvodové stěně budovy (uvnitř budovy)

D (m) – vzdálenost od obou antén k obvodové stěně budovy (vně budovy)

S (m) – skutečná vzdálenost od vnější antény ke stěně budovy v příslušném patře

f (GHz) – frekvence

$W_e$  (dB) – činitel útlumu obvodové stěny budovy pro  $\Theta = 90^\circ$

$W G_e$  (dB) – činitel útlumu obvodové stěny budovy pro  $\Theta = 0^\circ$

$W_i$  (dB) – činitel útlumu vnitřní příčky

p (-) – počet příček mezi obvodovou stěnou a mobilní anténou

$\alpha$  (dB/m) – specifický útlum při šíření nezastíněném příčkou uvnitř budovy

COST231 modely k predikci úrovně signálu uvnitř budov jsou omezeny následovně:

$$S < 500 \text{ m}$$

V následující tabulce (tab. 1.6) jsou uvedeny doporučené parametry pro model COST231 k predikci úrovně signálu uvnitř budov při přímé viditelnosti.

Tabulka 1.6: *Doporučené parametry pro model COST231 k predikci úrovně signálu uvnitř budov, při přímé viditelnosti [1]*

Prostředí	Parametr	Hodnota [dB]
dřevěné a sádrokartonové stěny	$W_e, W_i$	4
zdi s normálními okny	$W_e, W_i$	7
běžné zdi a stěny	$W_e, W_i$	4-10
zdi bez oken	$W_e, W_i$	10-20

Výpočet COST231 modelu k predikci úrovně signálu uvnitř budov při zastínění mezi vysílací a přijímací anténou: [1]

$$L = L_{OUT} + W_e + W_{ge} + \max(\Gamma_1, \Gamma_3) - G_{FH} \quad (1.21)$$

$$\Gamma_3 = \alpha d$$

$$G_{FH} = nG_n, hG_h$$

$L$  (dB) – střední hodnota ztrát šířením

$L_{OUT}$  (dB) – ztráty spočtené některým z modelů pro šíření vně budovy

$W_{ge}$  (dB) – korekce pro činitel útlumu obvodové stěny

$G_{FH}$  (dB) – výškový zisk s dvěma alternativami výpočtu podle vstupních dat

$G_n$  (dB/patro) – výškový zisk na patro

$G_h$  (dB/m) – výškový zisk na jednotku výšky

$n$  (-) – číslo patra, kde je přijímací anténa

$h$  (m) – výška mobilní antény nad zemí

V následující tabulce (tab.1.7) jsou uvedeny doporučené parametry pro model COST231 k predikci úrovně signálů uvnitř budov při zastínění spoje.

Tabulka 1.7: *Doporučené parametry pro model COST231 k predikci úrovně signálů uvnitř budov, při zastínění spoje [1]*

Poznámka	Parametr	Hodnota [dB]
pásmo 900 MHz	Wge	3-5
Pásmo 1800 MHz	Wge	5-7
budovy s vysokými stropy (4-7 m)	Gn	4-7/patro

- **Stochastické modely**

Tyto modely pracují s vícecestným (mnohacestným) šířením elektromagnetického signálu. Stochastické modely vychází ze statistiky a pravděpodobnostních funkcí. Díky toho pro jednotlivé simulace šíření signálu vychází odlišné výsledky. Provedením více simulací vzniká soubor možných rozložení výkonu elektromagnetické vlny v časově proměnném kanálu. Pro přesnější výsledek se provádí větší počet simulací šíření signálu. [1]

## 2 Měření vícecestného šíření radiového signálu v zástavbě

### 2.1 Popis praktického měření

První měření vícecestného šíření radiového signálu jsem prováděl na 5. patře školní budovy FEI (Fakulta elektrotechniky a informatiky). Na tomto patře se nachází pouze kanceláře. V době měření výuka na 5. patře neprobíhala, tudíž chodby byly po většinu času prázdné. Díky toho jsem měl ideální prostředí pro měření vícecestného šíření radiového signálu.

Druhé měření vícecestného šíření radiového signálu jsem uskutečnil na několika vybraných místech areálu Vysoké školy báňské.

Jako přijímací signál pro praktické měření jsem vybral rádiový signál rádia Helax, který vysílá na frekvenci 93,7 MHz. Tento signál vysílá vysílač Hošťákovice, který se nachází přibližně 5 km vzdušnou čarou od areálu Vysoké školy báňské.

Vysílač Hošťákovice má výšku 184,5 m. Tento vysílač má horizontální polarizaci. Měřený rádiový signál (93,7 MHz) je vyslán s efektivním vyzářeným výkonem (ERP) 39,81 kW.

Pro praktické měření jsem používal následující přístroje:

- spektrální analyzátor Rohde & Schwarz FSH8
- všesměrová prutová anténa magnetická mobilní (zisk antény 9 dBi, polarizace: vertikální, maximální přenášený výkon: 30 W)



Obrázek 2.1: *Vysílač Hošťákovice [19]*

## 2.2 Simulace a měření vícecestného šíření radiového signálu v budově

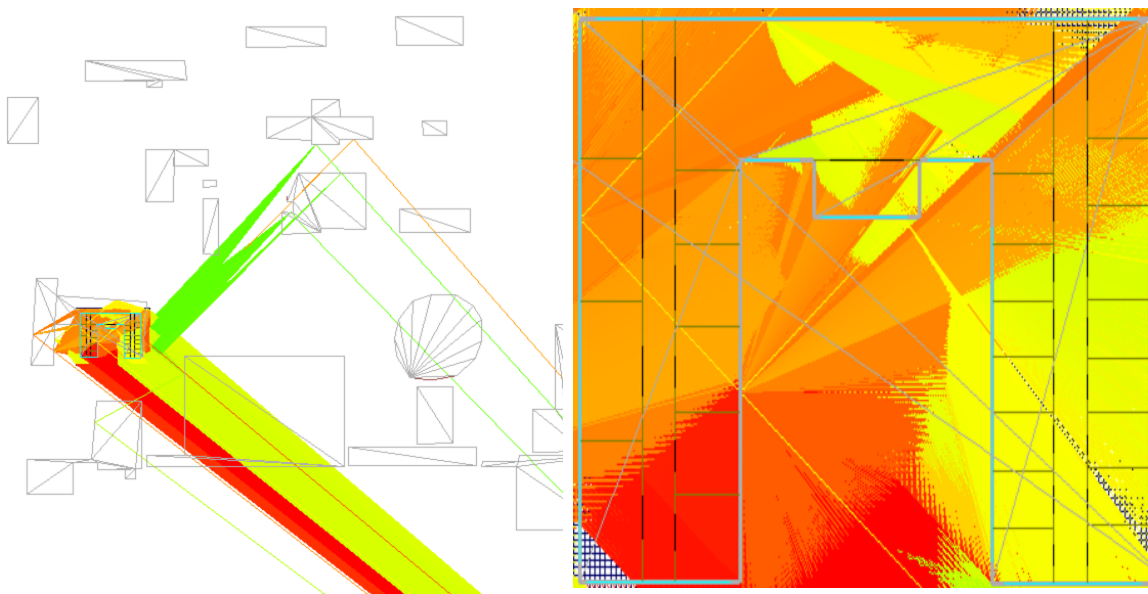
### • Simulace

Simulaci praktického měření jsem zrealizoval pomocí studentské verze programu Radiowave Propagation Simulator (RPS). Tato studentská verze je poskytována zdarma. K plné verzi tohoto programu je potřeba zakoupit licenci od firmy Radioplan. Studentská verze programu RPS je omezena počtem vykreslení rádiových paprsků. Studentská verze dokáže vykreslit pouze 50 000 paprsků najednou.

Pro potřebu simulace je potřeba nakreslit půdorys budovy, místnosti apod. V tomto půdorysu je důležité nastavit, z jakých materiálů se jednotlivé zakreslené stavební části skládají (zdi, podlaha, okna, dveře apod.). Před spuštěním simulace je potřeba nastavit parametry vysílače a přijímače. Nakonec se nastaví, jaký model simulace chceme použít. Modely simulace nastavíme podle daného simulačního prostředí (makrobuňky, mikrobuňky, pikobuňky). Jednotlivé simulační modely jsou popsány v kapitole 1.4.

Na základě výše uvedeného jsem postupoval následovně:

V simulačním programu RPS jsem nakreslil 5. patro budovy FEI. Jednotlivým částem patra (okna, dveře, podlaha, venkovní zdi, vnitřní zdi) jsem přiřadil příslušný materiál. Dále jsem nastavil parametry vysílače (výška, výkon, kmitočet vysílané frekvence). Poté jsem v simulačním programu nakreslil budovy areálu Vysoké školy báňské. Jako simulační model jsem vybral model Ray Tracing. Tento model je popsán v kapitole 1.4.

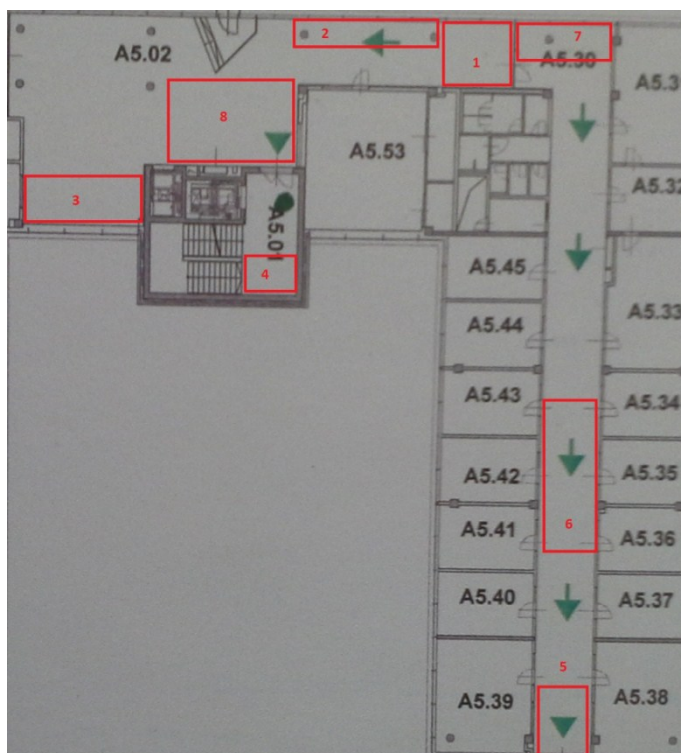


Obrázek 2.2: *Levá část: Výsledek simulace v budově. Pravá část: Úniky signálu na 5. patře budovy FEI*

Z výsledných simulací vyplývá (obr. 2.2), že na 5. patře budovy FEI je zaznamenán velký vliv vícecestného šíření radiového signálů. Dochází k velkým únikům signálu. Jelikož přijímaný radiový signál byl přijímán z vysílače Hošťálkovice, který je vzdálený od místa příjmu přibližně 5 km vzdušnou čarou, výsledky simulace nejsou přesné, ale pouze orientační. Pokud bych chtěl získat co nejvíce přesné výsledky, musel bych v simulačním programu nakreslit celou zástavbu (budovy, lesy apod.), která se nachází mezi vysílaným a přijímaným místem. Pomocí jednotlivých simulací jsem chtěl zjistit, jak se radiový signál bude chovat v areálu vysoké školy báňské. Z obrázku (obr. 2.2) lze vidět, že radiový signál se odráží, ohýbá nebo dochází k rozptýlům od několika budov areálu VŠB (Vysoká škola Báňská). Mezi tyto budovy patří CPIT (Vědecko-výzkumné laboratoře), NK (Nová knihovna) a budova FEI. Plán areálu VŠB se nachází v kapitole 2.3.

### • Měření

Měřenou plochu (5. patro) jsem rozdělil na 8 částí (obr. 2.3). V každé části bylo provedeno měření vlivu vícecestného šíření radiového signálu. Jednotlivé části byly rozděleny na „čtvercové body“, které byly od sebe rozmístěny přibližně 10 cm. Ve čtvercovém bodě pomocí spektrálního analyzátoru byla naměřena úroveň signálu, která byla zaznamenána. Poté byla všesměrová anténa posunuta přibližně o 10 cm vedle poslední měřené pozice. Tímhle byly zaznamenány jednotlivé úniky signálu (fading efekt) na měřené ploše.



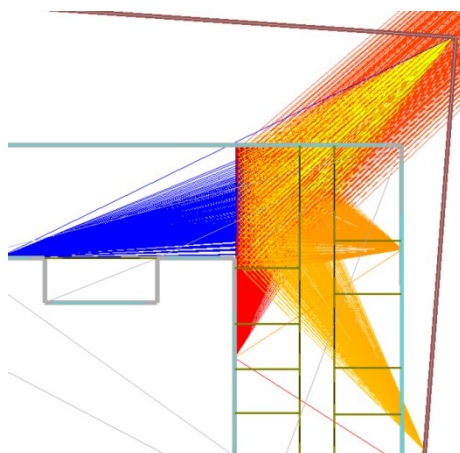
Obrázek 2.3: Rozdělení měřené plochy

Všechny měření na 5. patře budovy FEI probíhaly dne 24. 10. 2014.

V programu Matlab R2014a byly vykresleny 3D grafy, které znázorňují úniky signálu, ke kterým docházelo v měřeních. Pro lepší znázornění úniků signálu byly grafy upraveny pomocí ekvivalentního filtru. Skutečné grafy se nachází v přílohách.

Z výsledných naměřených výsledků vyplývají následující závěry:

○ **Simulace č. 1:**



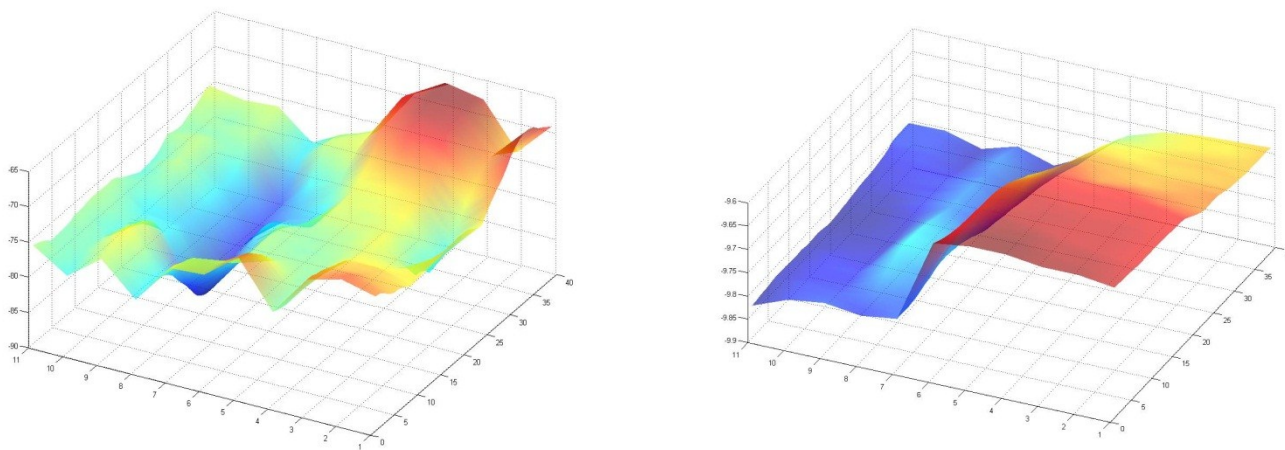
Obrázek 2.4: *Simulace č.1*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.4), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy (CPIT), od oken kanceláře a stěn chodby. Dále signál přicházel od stěn, které jsou z větší části prosklené, k přijímacímu místu.

○ **Měření č. 1:**

Měření probíhalo podélně u vnitřní stěny budovy. Uprostřed vnitřní stěny byly umístěny skleněné dveře, které v době měření byly otevřené. Za skleněnými dveřmi se nacházela dlouhá chodba a kanceláře. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovová deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. U vnitřní zdi byly zaznamenány malé úniky signálu (-75 až -80 dBm). Mezi jednotlivými úrovněmi signálu byly naměřeny malé skoky. Nejlepší úroveň signálu byly naměřeny v místech, kde se nacházely otevřené skleněné dveře (-60 až -68 dBm). Pokles úrovně signálu vůči úrovním signálu u otevřených dveří, byl velmi velký, například až desítky dBm. Lepší úroveň signálu u otevřených dveří, dle mého názoru, byla způsobena možným průchodem přijímaných paprsků signálu chodbou přes kanceláře. Tyto kanceláře byly ve směru vysílače Hošťálkovice, od kterého byl přijímán radiový signál. Z postupným vzdalováním se od vnitřní

stěny, byly naměřeny horší úrovně signálu (-80 až -90 dBm). Tento jev mohl být způsobený mnohonásobnými odrazy signálu od stěnných nosných sloupů, které se vyskytovaly na chodbě.



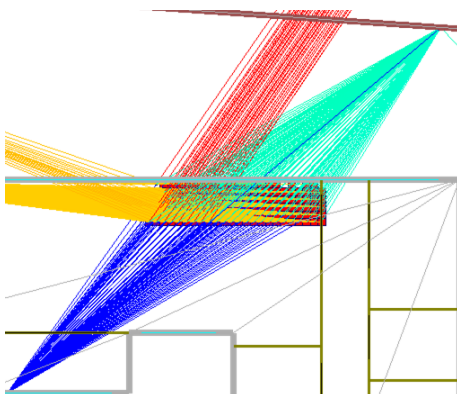
Obrázek 2.5: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 1. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 1 (skutečné rozměry 4 m x 1m)*

Při porovnání grafů ze simulace č. 1 a z praktického měření č. 1 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace, postupným vzdalováním přijímací antény od stěny klesá úroveň signálu
- v praktickém měření lze zaznamenat více úniků signálu, než zaznamená simulační program
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem - 10 dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem - 70 dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.



○ **Simulace č. 2:**

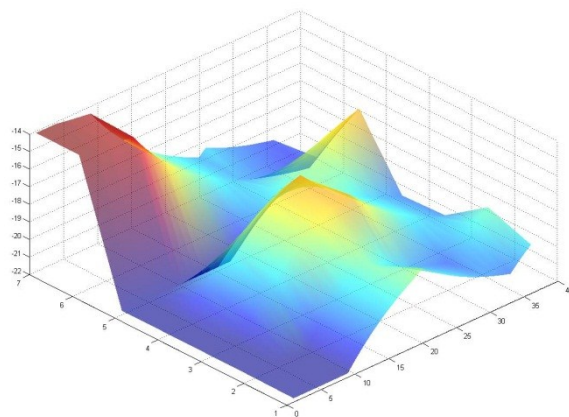
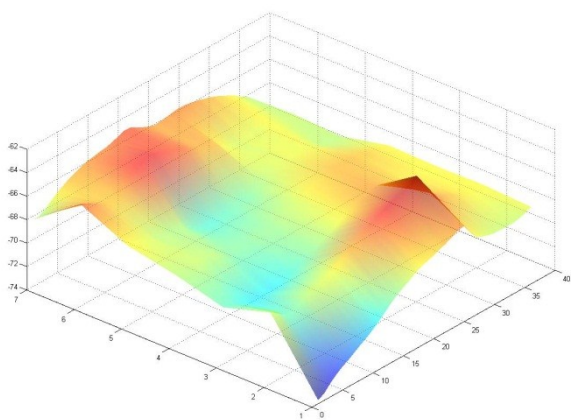


Obrázek 2.6: *Simulace č. 2*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.6), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy (TL – Těžké laboratoře), od zadní části budovy FEI a od skleněné stěny, která se nachází v místě měření č. 4.

○ **Měření č. 2:**

Měření probíhalo podélně u zavřeného okna. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem okna. Z této strany budovy nebyl přímý výhled na vysílač Hošťálkovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Naproti budovy, ve které probíhalo měření, se nacházely budovy, od kterých se signál odrážel (ohýbal, rozptyloval) k přijímací anténě. U tohoto měření byly zaznamenány velmi malé úniky signálů. Hodnoty úrovně signálů se od sebe lišily minimálně. Úrovně signálu se pohybovali od  $-58$  až  $-76$  dBm. V některých případech byly naměřeny horší (menší) úrovně signálu. Tento jev mohl být způsoben pohybem lidí na chodbě, ve které probíhalo měření. Jelikož na 5. patře budovy FEI neprobíhala žádná výuka, tento jev (pohyb lidí) se vyskytoval minimálně.



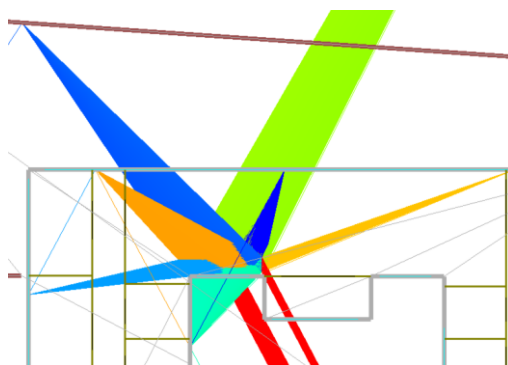
Obrázek 2.7: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 2. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 2 (skutečné rozměry 3,6 m x 0,7 m)*

Při porovnání grafů z měření č. 1 a grafů z měření č. 2 je vidět, že u měření č. 2 byly zaznamenány menší úniky signálu.

Při porovnání grafů ze simulace č. 2 a z praktického měření č. 2 vychází následující závěry:

- u simulace č. 2 dochází k častějším změnám mezi jednotlivými úrovněmi signálu než u předchozí simulace č. 1. Polovina hodnot se pohybuje kolem -15 dBm, další polovina kolem -21 dBm .
- mezi hodnotami kolem -15 dBm dochází k velmi malým únikům signálu
- mezi hodnotami kolem -21 dBm dochází k velmi malým únikům signálu
- simulační program nedokáže zaznamenat takový počet úniků signálu jako u praktického měření.
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem -15 až -21 dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem -58 až -76 dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

○ **Simulace č. 3:**



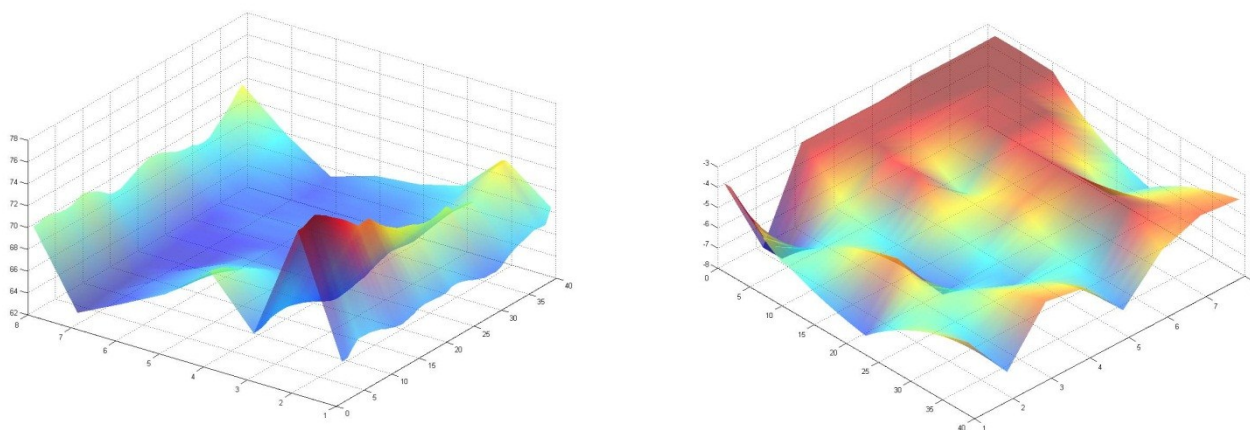
Obrázek 2.8: *Simulace č. 3*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.8), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy VEC (Výzkumné energetické centrum), od venkovní budovy NK, od oken kanceláří a stěn chodby v levé části 5. patra a od stěn chodby v pravé části 5. patra.

### ○ Měření č. 3:

Měření probíhalo podélně u stěny s několika zavřenými okny. Mezi jednotlivými okny se nacházely meziokenní sloupky. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem stěny. Stěna, u které probíhalo měření, byla umístěna ve směru k vysílači Hošťálkovice, ze kterého byl přijímán rádiový signál. Naproti stěny se nacházelo několik vysokých budov, od kterých se signál k přijímací anténě odrazil (ohýbal, rozptyloval). U měření byly zaznamenány malé úniky signálu.

Na rozdíl od měření č. 2, kde se nacházela pouze okna (bez meziokenních sloupů), byly u měření č. 3 zjištěny velké rozdíly mezi jednotlivými úrovněmi signálu. Úrovně signálu zjištěné u oken se pohybovaly přibližně od -64 až -70 dBm. Úrovně signálu zjištěné u meziokenních sloupů se pohybovaly přibližně od -70 až -76 dBm.



Obrázek 2.9: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 3. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 3 (skutečné rozměry 4 m x 0,8 m)*

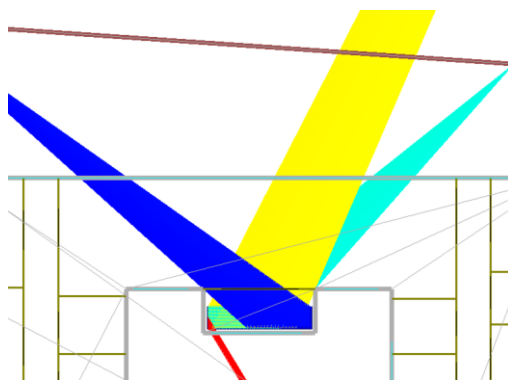
Při srovnání grafu z měření č. 2 a grafu z měření č. 3 je patrné, že u obou měření dochází k malým únikům signálu. U měření č. 3 na rozdíl od měření č. 2 dochází v některých případech k velkým rozdílům mezi úrovněmi signálu (měření u oken a měření u meziokenních sloupů).

Při porovnání grafů ze simulace č. 3 a z praktického měření č. 3 vychází následující závěry:

- podobně jako u praktického měření v simulaci dochází k rozdílným hodnotám úrovně signálu. První část hodnot se pohybuje kolem -16 dBm, druhá část hodnot se pohybuje kolem -19 dBm.
- mezi hodnotami kolem -16 dBm dochází k velmi malým únikům signálu
- mezi hodnotami kolem -19 dBm dochází k velmi malým únikům signálu

- simulační program nedokáže zaznamenat takový počet úniků signálu jako u praktického měření. Při praktickém měření byly naměřeny při posouvání přijímací všesměrové antény co 10 cm pokaždé rozdílné hodnoty. U simulace se hodnoty úrovně signálu (co 10 cm) ve většině případu neměnily.
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-16$  až  $-19$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-64$  až  $-76$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

○ **Simulace č. 4:**

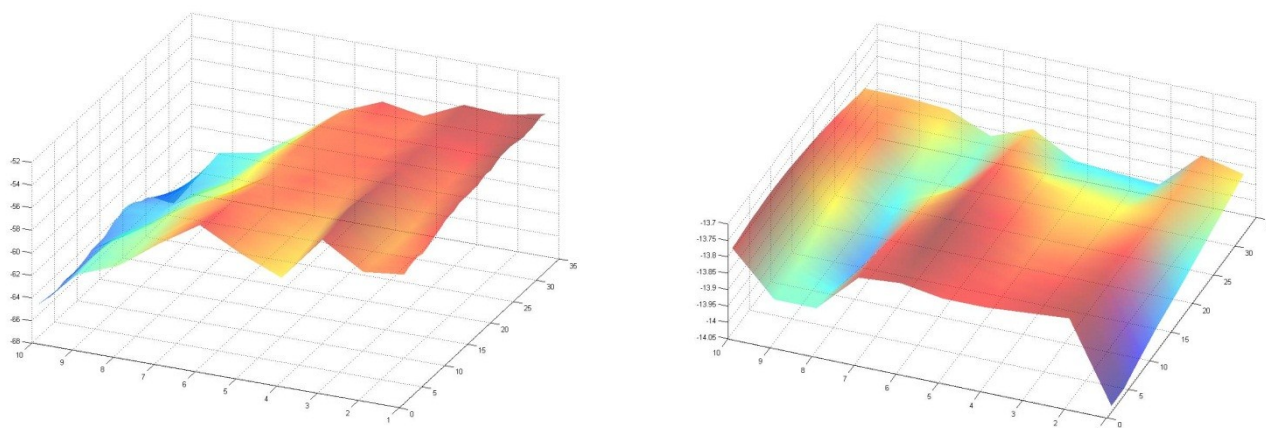


Obrázek 2.10: Simulace č. 4

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.10), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy VEC (Výzkumné energetické centrum) a od zadní části budovy FEI.

○ **Měření č. 4:**

Měření probíhalo podélně u stěny. Uprostřed stěny bylo umístěné zavřené okno. Stěna byla ve směru vysílače Hošťálkovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem stěny. Kolem měřeného místa se nenacházely žádné místnosti nebo kanceláře. Z tohoto důvodu byly zaznamenány oproti ostatním měřením na 5. patře nejlepší úrovně signálu (největší). Naproti stěny, kde probíhalo měření, se vyskytovaly vysoké budovy, od kterých se odrážel (ohýbal, rozptyloval) přijímaný signál. U tohoto měření byly naměřeny velmi malé úniky signálu. Úroveň signálu se pohybovala od  $-54$  do  $-66$  dBm.



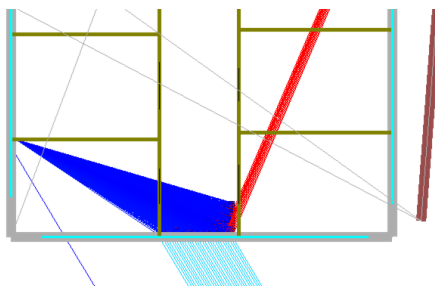
Obrázek 2.11: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 4. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 4 (skutečné rozměry 3,2 m x 1 m)*

Při srovnání grafů ze všech měření je možné vypozorovat, že u měření č. 4 docházelo k nejmenším únikům signálu. Tento jev je způsobený tím, že se okolo měřeného místa nenacházeli žádné místnosti nebo kanceláře, které by měly za následek větší vliv vícecestného šíření signálu.

Při porovnání grafů ze simulace č. 4 a z praktického měření č. 4 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i v simulaci dochází k velmi malým únikům signálu
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-13,8$  až  $-14$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-54$  až  $-66$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.
- zatímco u praktického měření byly naměřeny nejlepší (největší) hodnoty úrovně signálu, při simulaci na rozdíl od jiných simulací nebyly zaznamenány nejlepší hodnoty úrovně signálu. Tento jev byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu.

○ **Simulace č. 5:**



Obrázek 2.12: *Simulace č. 5*

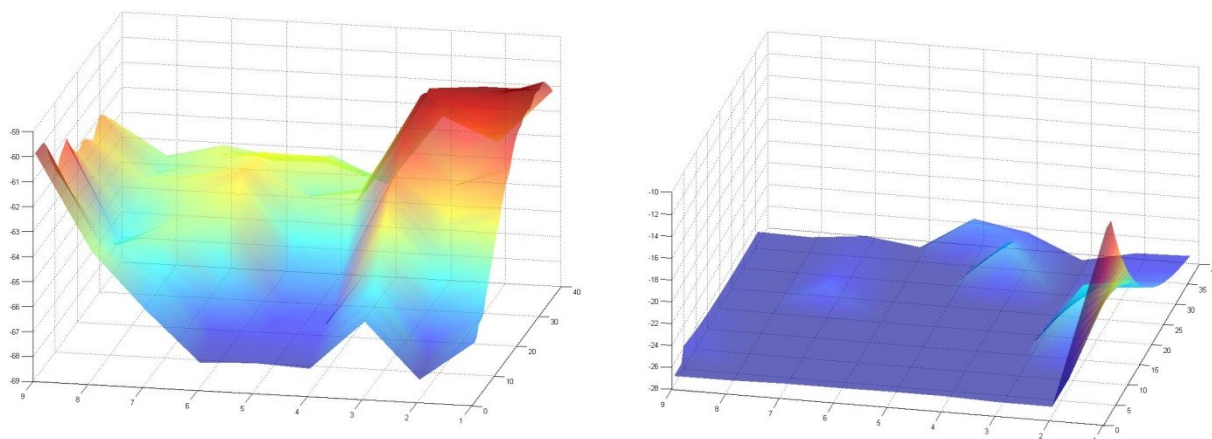
Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.12), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) pouze od venkovní budovy VEC (Výzkumné energetické centrum) a od oken jedné kanceláře.

○ **Měření č. 5:**

Měření probíhalo podélně u stěny. Stěna byla téměř z celé části prosklená. Tato stěna byla ve směru vysílače Hošťálkovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem stěny. Naproti stěny, u které probíhalo měření, byly vysoké budovy, od kterých se odrážel (ohýbal, rozptyloval) přijímaný signál. Po celou dobu tohoto měření probíhalo měření na okraji budovy. Signál se tedy odrážel od budov, které byly mezi vysílačem a přijímaným místem. V 5. patře měřené budovy se signál odrážel (ohýbal, rozptyloval) minimálně. Z tohoto důvodu byly zaznamenány malé úniky signálu. Úrovně signálu se mezi sebou lišily minimálně.

U tohoto měření byly naměřeny také velké rozdíly mezi jednotlivými úrovněmi signálu. Pokud všesměrová přijímací anténa byla umístěna u okna, úrovně signálu se pohybovaly od -56 do -68 dBm. Pokud všesměrová přijímací anténa byla umístěna u stěny, úrovně signálu se pohybovaly od -65 do -70 dBm.





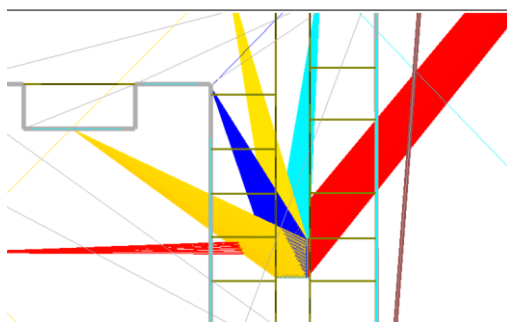
Obrázek 2.13: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 5. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 5 (skutečné rozměry 3,6 m x 1 m)*

Při srovnání grafů z měření č. 2 a grafů z měření č. 5 je vidět, že u obou měření dochází k malým únikům signálu. U měření č. 5 na rozdíl od měření č. 2 dochází k velkým rozdílům mezi úrovněmi signálu (měření u oken a měření u stěny).

Při porovnání grafů ze simulace č. 5 a z praktického měření č. 5 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i v simulaci, dochází k velmi malým únikům signálu
- stejně jako u praktického měření, tak i v simulaci, dochází v některých případech k rozdílným hodnotám mezi úrovněmi signálu (simulace u oken, simulace u stěny)
- v simulaci byl zaznamenán menší počet úniků signálu než u praktického měření
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu, než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-12$  až  $-26$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-56$  až  $-70$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

#### ○ Simulace č. 6:

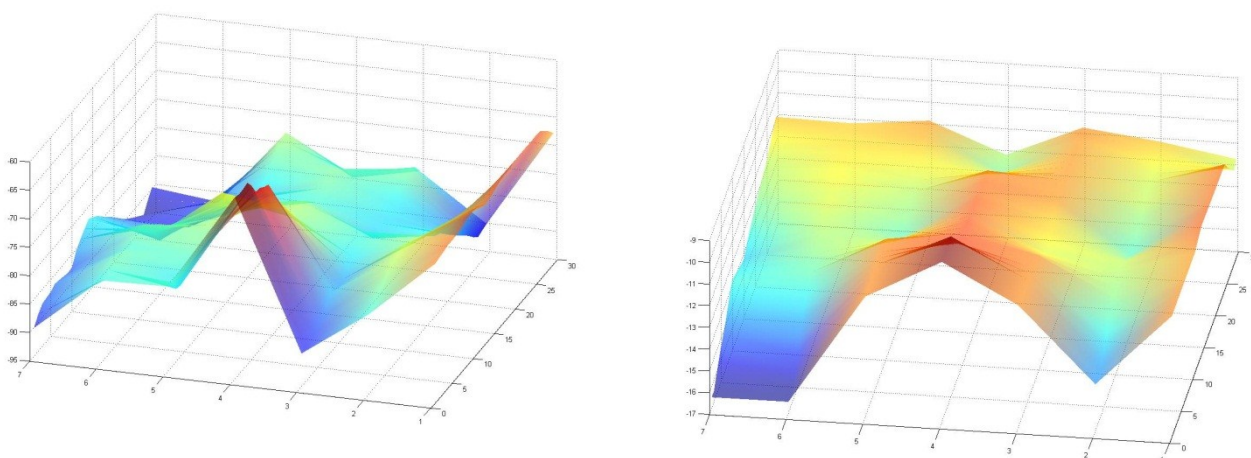


Obrázek 2.14: *Simulace č.6*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.14), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy VEC, od oken kanceláří, které se nacházejí kolem chodby, kde probíhalo praktické měření, od skleněné stěny, která se nachází v místě měření č. 4, od skleněné stěny, která se nachází v místě měření č. 2 a od venkovní stěny v levé části 5. patra budovy FEI.

#### ○ **Měření č. 6:**

Měření probíhalo uprostřed dlouhé chodby. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. Všesměrová anténa mohla přijímat radiový signál z vysílače Hošťálkovice několika způsoby. Přijímaný signál mohl projít stěnou tvořenou okny. Tato stěna se nacházela ve směru vysílače. V tomto případě by se signál odrážel (ohýbal, rozptyloval) od protějších vysokých budov. Dále mohl přijímaný signál projít jinou stěnou tvořenou okny. Tato stěna se nacházela na opačné straně budovy jako předchozí stěna. V tomto případě by se přijímaný signál odrážel (ohýbal, rozptyloval) od budov, které se nacházejí za budovou, ve které jsem měřil. Další možností je, že přijímaný signál mohl dorazit k přijímací anténě přes kanceláře, které se nacházeli kolem celé chodby, kde probíhalo měření. Z těchto důvodů byly naměřeny hodnoty úrovně signálu s velkými úniky signálu (rychlé úniky). Hodnoty úrovně signálu se mezi sebou velmi lišily (-60 až -105 dBm).



Obrázek 2.15: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 6. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 6 (skutečné rozměry 3 m x 0,7 m)*

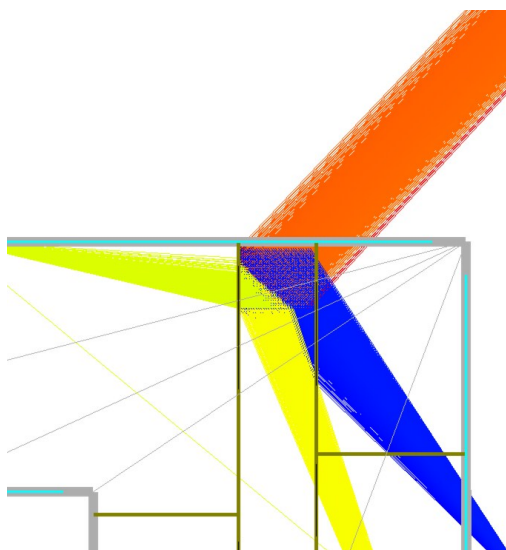
Při srovnání grafů všech dosavadních měření č. (1-6) lze odvodit, že měření č. 6 mělo největší (rychlé) úniky signálu. Tento jev byl způsoben velkou členitostí interiérů kolem měřeného místa (kanceláře). Z tohoto důvodu docházelo k největším vlivům vícecestného šíření signálu.



Při porovnání grafů ze simulace č. 6 a z praktického měření č. 6 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i v simulaci dochází k velmi velkým únikům signálu
- na rozdíl od předchozích simulačních výsledků v simulaci č. 6 byl zaznamenán větší počet úniků signálu. To bylo dosaženo nakreslením kanceláří do simulačního plánu (větší odraz, ohyb a rozptyl signálu).
- v praktickém měření byl naměřen větší počet úniků signálu než u simulace. Větší počet úniků signálu u praktického měření byl způsoben mimo jiné tím, že v simulačním prostředí v jednotlivých kancelářích nebyl zakreslený interiér.
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-10$  až  $-16$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-60$  až  $-105$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

○ **Simulace č. 7:**

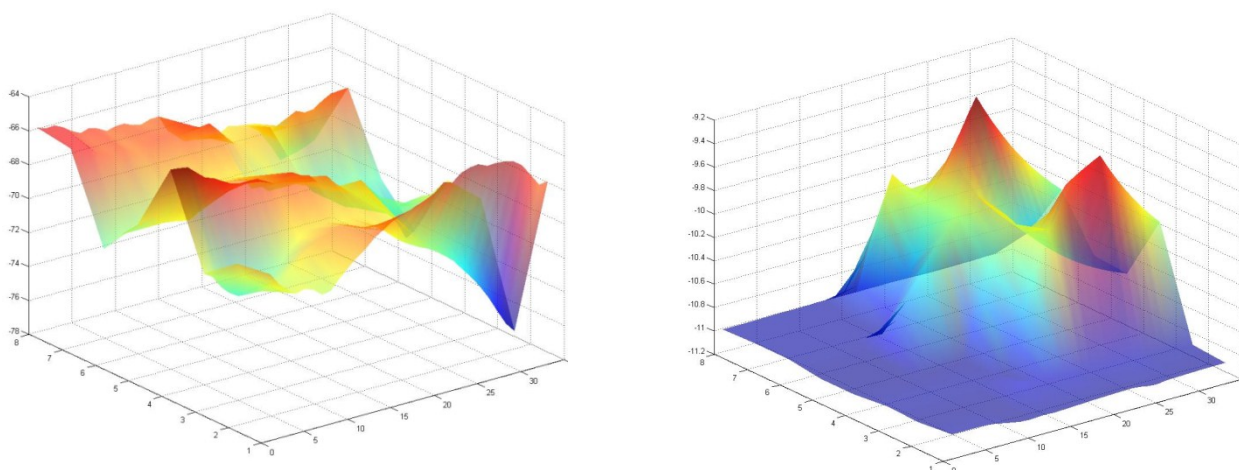


Obrázek 2.16: *Simulace č. 7*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.16), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy CPIT, od oken kanceláří, od pravé části budovy FEI a od skleněné stěny, která se nachází v místě měření č. 2.

### ○ Měření č. 7:

Měření probíhalo podélně u stěny. Stěna je téměř z celé části prosklená. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. Stěna, u které probíhalo měření, byla na opačné straně, než byl vysílač Hošťálkovice, od kterého byl přijímán radiový signál. Z tohoto důvodu se přijímaný signál odrážel (ohýbal, rozptyloval) od protějších budov. Ve většině případů měření docházelo k malým únikům signálu. Úrovně signálu se pohybovaly od -66 do 70 dBm. V některých případech byly zaznamenány větší uniky signálu. V tomto případě se úroveň signálu pohybovala od -66 do -76 dBm. Větší uniky signálu byly způsobeny vícecestným šířením signálu. Přijímaný radiový signál procházel do místa příjmu kanceláři apod. Díky toho docházelo k častým ohybům, odrazům nebo rozptylům přijímaného radiového signálu.



Obrázek 2.17: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 7. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 7 (skutečné rozměry 3,3 m x 0,8 m)*

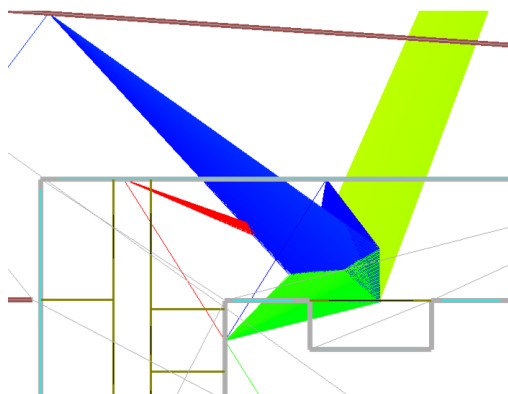
Z výsledných grafů vyplývá, že v průběhu měření č. 7 docházelo k malým únikům signálu (měření u okna). V některých případech docházelo k velkým únikům signálu (měření u zdi).

Při porovnání grafů ze simulace č. 7 a z praktického měření č. 7 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i v simulaci dochází k malým únikům signálu
- na úrovni signálu kolem -16 dBm byl zaznamenán malý počet úniků signálu (nepřesné výsledky simulace)
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem -10 až -16 dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem -66 až -76 dBm.

Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

○ **Simulace č. 8:**

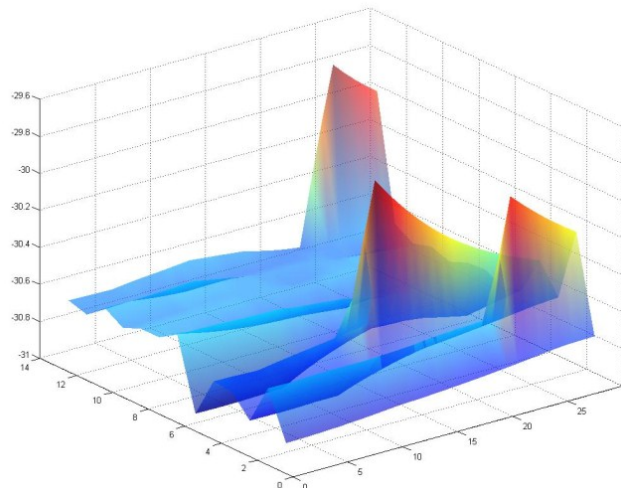
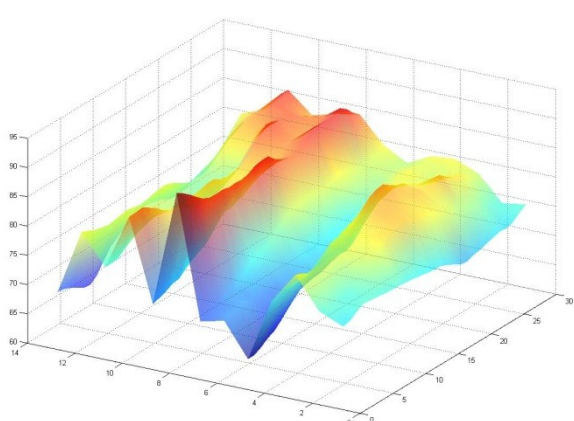


Obrázek 2.18: *Simulace č. 8*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.18), že přijímaný radiový signál se odrážel (ohýbal, rozptyloval) od venkovní budovy VEC, od zadní části budovy FEI a od skleněné stěny v levé části budovy.

○ **Měření č. 8:**

Měření probíhalo uprostřed velké chodby. U tohoto měření nebyl přímý výhled na vysílač Hošťákovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. Na tomto měření byly naměřeny nejhorší výsledky úrovně signálu (nejmenší). Příčinou bylo velké zastínění okolí (nosné sloupky, výtah, kanceláře apod.). Díky velké členitosti interiéru byly zaznamenány největší úniky signálu za celé měření v 5. patře budovy FEI. Úroveň signálu se pohybovala mezi -60 až -105 dBm.



Obrázek 2.19: *Levá část: Úniky signálu v měření č. 8. Pravá část: Úniky signálu v simulaci č. 8 (skutečné rozměry 3 m x 1,3 m)*

Z výsledných grafů lze snadno poznat, že v měření č. 8 byl naměřen největší vliv vícecestného šíření signálu (rychlé úniky).

Při porovnání grafů ze simulace č. 8 a z praktického měření č. 8 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření tak i u simulace byly naměřeny nejhorší úrovně signálu ze všech simulací (členitý interiér)
- na rozdíl od praktického měření, kde byly naměřeny největší úniky signálu, v simulaci byly zaznamenány až na pár výjimek malé úniky signálu. Malé úniky signálu byly zaznamenány, protože v simulačním programu nebylo možné zakreslit všechny překážky, které se vyskytovaly u praktického měření (výtah, schody, stěnné sloupy, v některých případech i procházející lidé)
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-26$  až  $-30$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-60$  až  $-105$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

## 2.3 Simulace a měření vícecestného šíření radiového signálu v zástavbě

### • Simulace

Simulace praktického měření byla provedena pomocí studentské verze programu Radiowave Propagation Simulator (RPS). Více o tomto programu v kapitole 2.2.

V simulačním programu RPS byly nakresleny budovy areálu Vysoké školy báňské, dále nastaveny parametry vysílače (výška, výkon, kmitočet vysílané frekvence). Jako simulační model byl vybrán model Ray Tracing. Tento model je popsán v kapitole 1.4.

### • Měření

Měřená plocha (venkovní měření 1,2,3,4) byla rozdělena na „čtvercové body“, které byly od sebe rozmístěny přibližně 10 cm. Ve čtvercovém bodě byly pomocí spektrálního analyzátoru naměřeny úrovně signálu, které byly zaznamenány. Poté byla posunována všesměrová anténa přibližně 10 cm vedle poslední pozice a zaznamenána úroveň signálu. Tímto byly zjištěny jednotlivé úniky signálu (fading efekt) na měřené ploše.

Měření byly ve většině případů provedeny v oblastech, do kterých nezasahovaly různé nežádoucí jevy, jako jsou projíždějící auta, procházející chodci apod. Pro venkovní měření byly

vybrány dny, kdy zemský povrch nebyl vlhký (zasněžený, mokrý) a bylo jasné počasí s dobrým optickým výhledem směrem k vysílači Hošťálkovice.

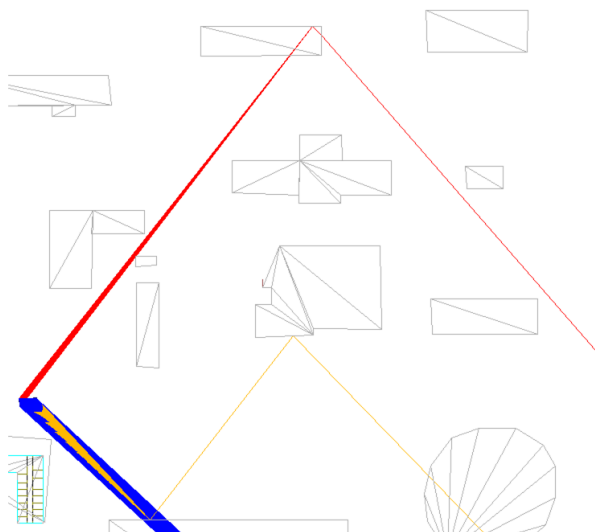
Na následujícím obrázku (obr. 2.20) je znázorněn areál Vysoké školy báňské. Na obrázku jsou znázorněny body (1,2,3,4), kde byla provedena praktická měření.



Obrázek 2.20: Areál Vysoké školy báňské [20]

V programu Matlab R2014a byly vykresleny 3D grafy, které znázorňují úniky signálu, ke kterým docházelo ve venkovním měření. Pro lepší znázornění úniků signálu byly grafy upraveny pomocí ekvivalentního filtru. Skutečné grafy se nachází v přílohách.

○ **Venkovní simulace č. 1:**



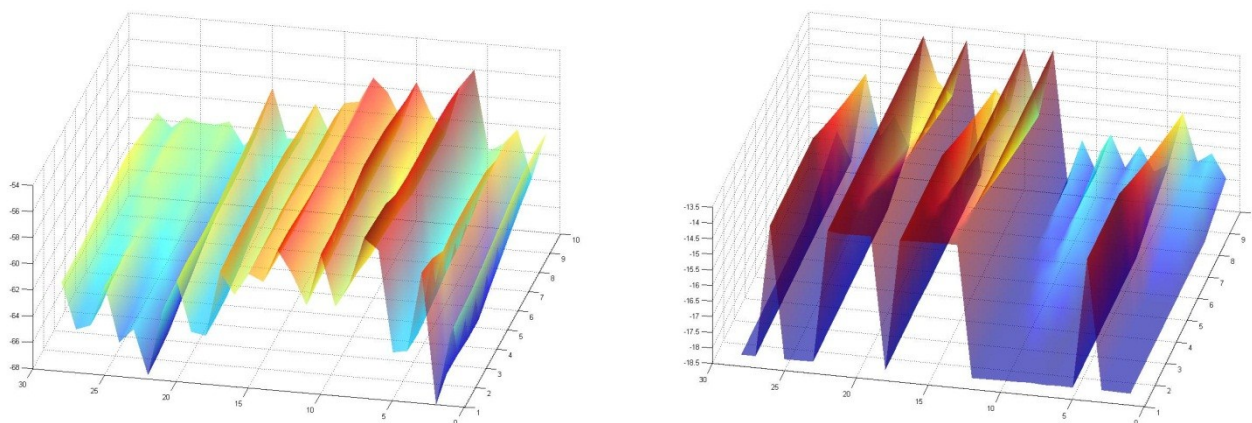
Obrázek 2.21: *Venkovní simulace č. 1*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.21), že na měřené ploše je zaznamenán velký vliv vícecestného šíření rádiového signálu. Dochází k velkým únikům signálu. Jelikož přijímaný radiový signál byl přijímán z vysílače Hošťákovice, který je vzdálený od místa příjmu přibližně 5 km vzdušnou čarou, výsledky simulace nejsou přesné, ale pouze orientační.

Pomocí jednotlivých simulací jsem chtěl zjistit, jak se radiový signál bude chovat v areálu Vysoké školy báňské. Z obrázku (obr. 2.21) lze vidět, že radiový signál se odráží, ohýbá nebo dochází k rozptylům od několika budov areálu VŠB. Mezi tyto budovy patří budova TL, budova CPIT, budova H (viz. plán VŠB). Plán areálu VŠB se nachází v kapitole 2.3 a v příloze.

○ **Venkovní měření č. 1:**

Měření probíhalo mezi dvěma budovami Vysoké školy báňské (budovy FEI a VEC) dne 28. 11. 2014. U tohoto měření nebyl přímý výhled na vysílač Hošťákovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. Díky velké členitosti terénu (budovy FEI, VEC, N, ÚG, NK, CPIT aj.) byl zaznamenán velký vliv vícecestného šíření rádiového signálu. Při měření docházelo k odrazům, ohybům (střechy budov) a rozptylům signálu. Z tohoto důvodu byly naměřeny velké (rychlé) úniky signálu. Hodnoty úrovně signálu se pohybovaly mezi -52 až -70 dBm.



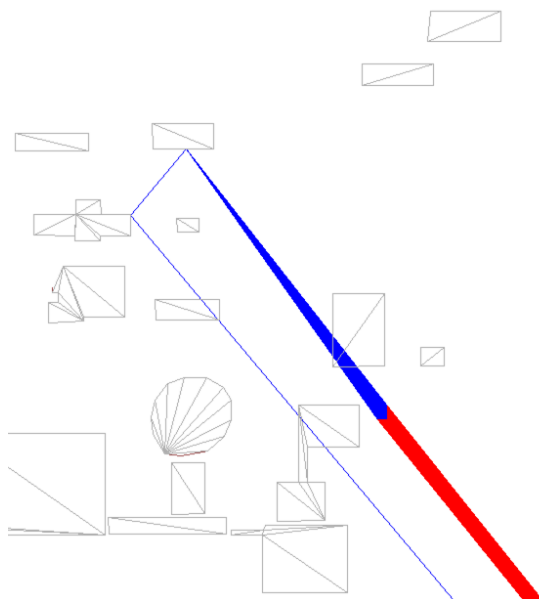
Obrázek 2.22: *Levá část: Úniky signálu ve venkovním měření č. 1. Pravá část: Úniky signálu ve venkovní simulaci č. 1 (skutečné rozměry 1 m x 2,8 m)*

Při porovnání grafů z venkovní simulace č. 1 a z venkovního měření č. 1 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace byly zaznamenány velké úniky signálu
- simulační program nedokázal zaznamenat tak velký počet úniků signálu, jako byly naměřeny při praktickém měření
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-13$  až  $-18$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-52$  až  $-70$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.



○ **Venkovní simulace č. 2:**



Obrázek 2.23: *Venkovní simulace č. 2*

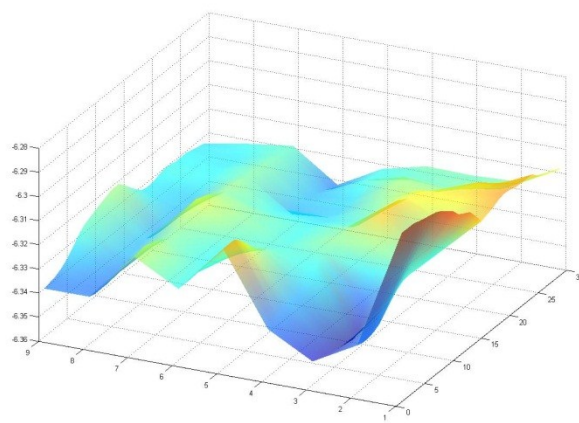
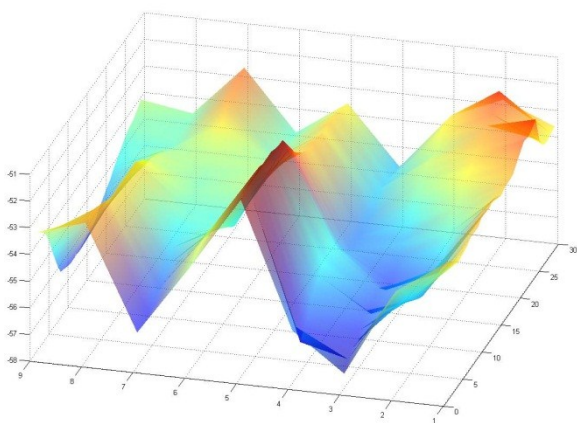
Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.23), že na měřené ploše byl zaznamenán malý vliv vícecestného šíření rádiového signálu. Dochází k malým unikům signálu. Jelikož přijímaný radiový signál byl přijímán z vysílače Hošťálkovice, který je vzdálený od místa příjmu přibližně 5 km vzdušnou čarou, výsledky simulace nejsou přesné, ale pouze orientační.

Pomocí jednotlivých simulací jsem chtěl zjistit, jak se radiový signál bude chovat v areálu vysoké školy báňské. Z obrázku (obr. 2.23) lze vidět, že radiový signál se odráží, ohýbá nebo dochází k rozptylům od několika budov areálu VŠB. Mezi tyto budovy patří budova CPIT, budova NM (menza) a budova SH (Sportovní hala). Plán areálu VŠB se nachází v kapitole 2.3 nebo v příloze.



### ○ Venkovní měření č. 2:

Měření probíhalo v méně členité oblasti areálu Vysoké školy báňské dne 12. 12. 2014. U tohoto měření byl dobrý výhled směrem na vysílač Hošťákovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovová deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. U tohoto měření byly naměřeny lepší hodnoty úrovně signálu než u venkovního měření č. 1. Tato skutečnost byla zapříčiněna lepším výběrem měřeného místa. Kolem místa tohoto měření se nacházelo pouze pár budov (budovy J, K, NM, VSH aj.), od kterých se přijímaný radiový signál odrážel, ohýbal nebo rozptyloval. Z tohoto důvodu docházelo k velmi malým únikům signálu. Hodnoty úrovně signálu se pohybovaly mezi -52 až -55 dBm. V některých případech byly zaznamenány velké změny mezi jednotlivými hodnotami úrovně signálů. Tento jev se vyskytoval v případech, kdy kolem měřeného místa působily různé nežádoucí vlivy, jako například procházející chodci nebo projíždějící auta. V okolí měřeného místa se také vyskytovalo několik vzrostlých stromů. To mělo taky za následek změnu hodnot úrovně signálů. V těchto případech se hodnoty úrovně signálu pohybovaly kolem -60 dBm.



Obrázek 2.24: *Levá část: Úniky signálu ve venkovním měření č. 2. Pravá část: Úniky signálu ve venkovní simulaci č. 2 (skutečné rozměry 3 m x 1 m)*

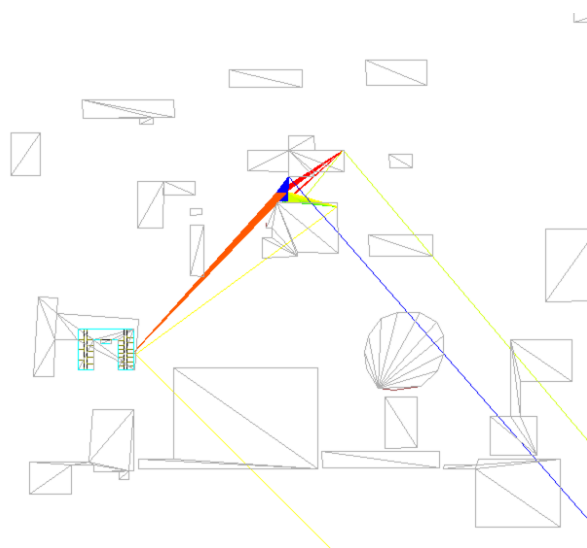
Z výsledných grafů pro venkovní měření lze vidět, že při venkovním měření č. 2 nedocházelo k tak velkým únikům signálu jako u venkovního měření č. 1. To bylo způsobeno vhodnějším výběrem měřeného okolí.

Při porovnání grafů z venkovní simulace č. 2 a z venkovního měření č. 2 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace byly zaznamenány malé úniky signálu
- simulační program nedokázal zaznamenat tak velký počet úniků signálu, jako byly naměřeny při praktickém měření

- v praktickém měření byly v některých případech naměřeny velké rozdíly mezi jednotlivými úrovněmi signálu, při simulaci tyto rozdíly nebyly zaznamenány. Simulační program nezahrnoval situace, kdy v místě měření se vyskytovaly nežádoucí jevy (chodci, auta apod.)
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-6$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-60$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

○ **Venkovní simulace č. 3:**



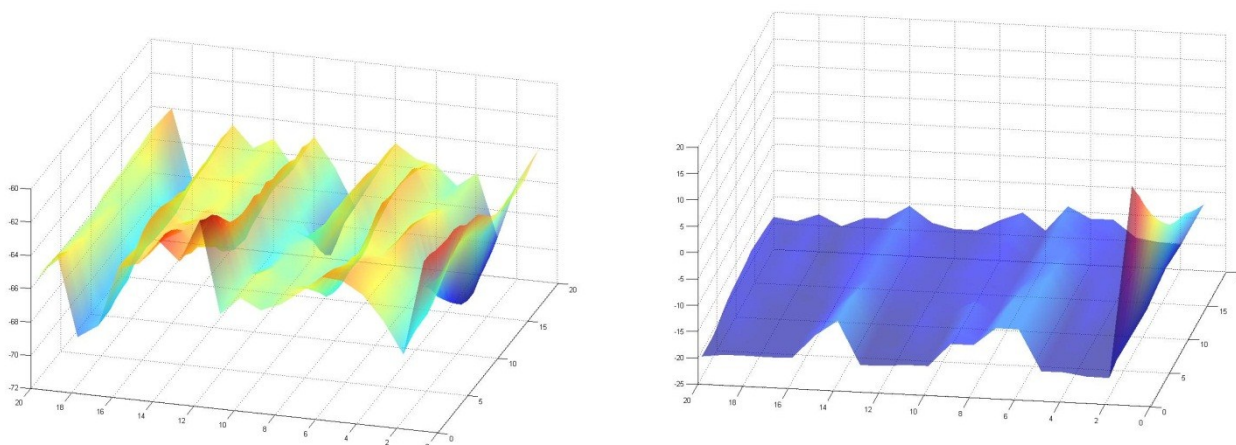
Obrázek 2.25: Venkovní simulace č. 3

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.25), že na měřené ploše byl zaznamenán největší vliv šíření vícecestného radiového signálu ze všech provedených venkovních měření. Dochází k velkým únikům signálu. Jelikož přijímaný radiový signál byl přijímán z vysílače Hošťálkovice, který je vzdálený od místa příjmu přibližně 5 km vzdušnou čarou, výsledky simulace nejsou přesné, ale pouze orientační.

Pomocí jednotlivých simulací jsem chtěl zjistit, jak se radiový signál bude chovat v areálu Vysoké školy báňské. Z obrázku (obr. 2.25) lze vidět, že radiový signál se odráží, ohýbá nebo dochází k rozptylům od několika budov areálu VŠB. Mezi tyto budovy patří budova FEI a budovy CPIT, kde se radiový signál odrážel pravidelně mezi budovami. Plán areálu VŠB se nachází v kapitole 2.3 nebo v příloze.

### ○ Venkovní měření č. 3:

Měření probíhalo ve velmi členité oblasti areálu Vysoké školy báňské dne 12. 12. 2014. U tohoto měření nebyl přímý výhled směrem na vysílač Hošťákovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovová deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. Při měření byl naměřen největší vliv vícecestného šíření radiového signálu ze všech venkovních měření. Byly zaznamenány velké úniky mezi jednotlivými hodnotami úrovně signálu. Tyto jevy byly zapříčiněny výběrem členitého terénu pro měření. Měření probíhalo přibližně uprostřed areálu VŠB. Kolem měřeného místa se nacházely vysoké budovy, od kterých se signál odrážel, ohýbal (difrakce) nebo docházelo k rozptylům. V místě měření často projížděla vozidla nebo procházeli chodci. To bylo důvodem, proč byly naměřeny velké rozdíly mezi jednotlivými úrovněmi signálu. Hodnoty úrovně signálu se pohybovaly mezi -60 až -80 dBm.



Obrázek 2.26: *Levá část: Úniky signálu ve venkovním měření č. 3. Pravá část: Úniky signálu ve venkovní simulaci č. 3 (skutečné rozměry 2 m x 2 m)*

Z výsledných grafů pro venkovní měření lze vidět, že při venkovním měření č. 3 byly zaznamenány největší úniky signálu ze všech venkovních měření. To bylo způsobeno špatným výběrem měřeného místa (členitý terén).

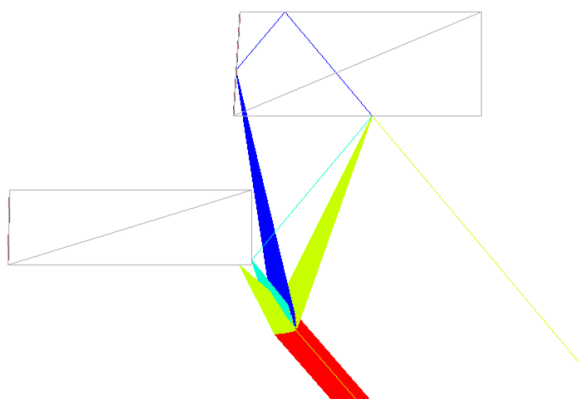
Při porovnání grafů z venkovní simulace č. 3 a z venkovního měření č. 3 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace byly naměřeny největší úniky signálu ze všech venkovních simulací
- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace byly naměřeny nejhorší úrovně signálu ze všech venkovních simulací
- na rozdíl od předchozích simulací, kde byl při simulacích pokaždé zaznamenán malý počet úniků signálu ve srovnání s praktickým měřením, v tomto případě byl

zaznamenán velký počet úniků signálu. Všechny předchozí simulace byly provedeny na krajích areálu VŠB. Jelikož v simulačním programu je nakreslen pouze areál VŠB (není zakreslena okolní zástavba mezi vysílaným a přijímaným místem), byl zjištěn malý počet úniků signálu (nemohlo docházet k velkému počtu odrazů, ohybů, rozptylů přijímacího signálu). Venkovní simulace č. 3 byla provedena uprostřed areálu VŠB. Tudíž mezi vysílaným a přijímaným místem se v simulačním programu nacházelo nejvíce budov. Z tohoto důvodu u venkovní simulace č. 3 byl získán největší počet úniků signálu.

- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu, než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-14$  až  $-28$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-60$  až  $-80$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

#### ○ Venkovní simulace č. 4:



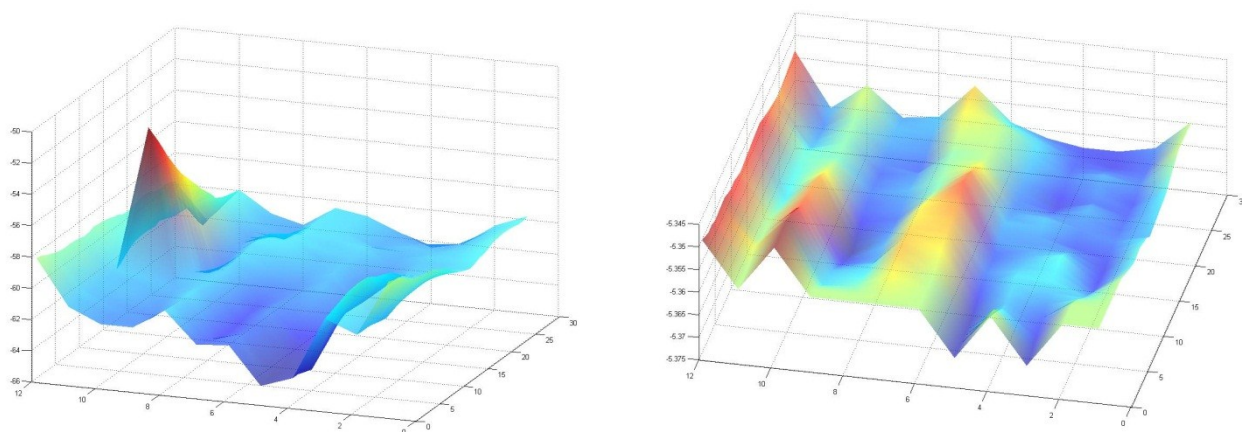
Obrázek 2.27: *Výsledky simulací z venkovního měření č. 4*

Z výsledné simulace vyplývá (obr. 2.27), že na měřené ploše byl zaznamenán nejmenší vliv šíření vícecestného radiového signálu ze všech provedených venkovních měření. Dochází k malým únikům signálu. Jelikož přijímaný radiový signál byl přijímán z vysílače Hošťálkovice, který je vzdálený od místa příjmu přibližně 5 km vzdušnou čarou, výsledky simulace nejsou přesné, ale pouze orientační.

Pomocí jednotlivých simulací jsem chtěl zjistit, jak se radiový signál bude chovat v areálu vysoké školy báňské. Z obrázku (obr. 2.27) lze vidět, že radiový signál se odráží, ohýbá nebo dochází k rozptylu pouze od školních kolejí (budova A a B). Plán areálu VŠB se nachází v kapitole 2.3 nebo v příloze.

#### ○ Venkovní měření č. 4:

Měření probíhalo v nejméně členité oblasti areálu Vysoké školy báňské dne 19. 12. 2014. U tohoto měření byl přímý optický výhled na vysílač Hošťákovice, ze kterého byl přijímán radiový signál. Všesměrová anténa byla umístěna na kovové desce na podlaze. Kovovou deska byla posouvána co 10 cm a pomocí spektrálního analyzátoru byly naměřeny hodnoty úrovně signálu. Měření probíhalo u kolejí (budovy A, B). Kromě těchto budov se kolem měřeného místa nevyskytovaly velké budovy, jako u předchozích venkovních měření. Z tohoto důvodu byly získány lepší hodnoty úrovně signálu než u předchozích venkovních měření. Byly zjištěny malé úniky mezi jednotlivými úrovněmi signálu. Přijímaný signál se mohl odrážet, ohýbat apod. od školních kolejí (dvě nejvyšší budovy areálu VŠB, budova A a B). Úrovně signálu se pohybovaly přibližně od -58 do -65 dBm.



Obrázek 2.28: *Levá část: Úniky signálu ve venkovním měření č. 4. Pravá část: Úniky signálu ve venkovní simulaci č. 4 (skutečné rozměry 3 m x 1,2 m)*

Z výsledných grafů pro venkovní měření lze vidět, že při venkovním měření č. 4 byl zaznamenán nejmenší vliv vícecestného šíření radiového signálu. Byly naměřeny nejmenší úniky signálu ze všech venkovních měření. To bylo způsobeno dobrým výběrem měřeného prostředí (nejlepší výhled ze všech venkovních měření na vysílač Hošťákovice).

Při porovnání grafů z venkovní simulace č. 4 a z venkovního měření č. 4 vychází následující závěry:

- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace byly zjištěny nejmenší úniky signálu ze všech venkovních simulací
- stejně jako u praktického měření, tak i u simulace byly naměřeny nejlepší úrovně signálu ze všech venkovních simulací

- na rozdíl od předchozí venkovní simulace č. 3, kde byl zaznamenán velký počet úniků signálu, v tomto případě byl zjištěn velmi malý počet úniků signálu (úroveň signálu se mezi sebou měnila minimálně). Venkovní simulace č. 4 byla provedena u školních kolejí budovy A a B. Tudíž mezi vysílaným a přijímaným místem se v simulačním programu nenacházely jiné budovy. Z tohoto důvodu byl u venkovní simulace č. 4 získán nejmenší počet úniků signálu
- v simulačním programu vyšly lepší (větší) úrovně signálu, než u praktického měření. Simulační program zaznamenal hodnoty úrovně signálu kolem  $-5$  dBm. Při praktickém měření byly naměřeny hodnoty úrovně signálu kolem  $-50$  až  $-58$  dBm. Tento velký rozdíl byl způsoben nepřesnými výsledky simulačního programu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu mezi vysílaným a přijímacím místem.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo nasimulovat a změřit vliv vícecestného šíření signálu na zadané ploše v zástavbě.

Úkolem diplomové práce bylo vyhodnotit naměřená a nasimulovaná data a zakreslit úniky signálu plošně do mapy prostoru.

První část práce je věnována elektromagnetickému signálu, popisuje jednotlivé radiové vlny a způsoby šíření elektromagnetického signálu v prostoru. Dále je v první části vytvořen přehled jednotlivých modelů šíření elektromagnetického signálu v zastavěném prostoru.

V druhé části diplomové práce jsou provedeny simulace a praktické měření vlivu vícecestného šíření signálu v areálu Vysoké školy báňské. Výsledky jednotlivých simulací a měření jsou zpracovány prostřednictvím grafů. Tyto grafy jsou vyhodnoceny a zakresleny plošně do mapy prostoru.

Praktickým měřením diplomové práce bylo zjištěno, že vícecestné šíření elektromagnetického signálu má velký vliv na kvalitu přijímaného signálu. Vícecestné šíření signálů způsobuje zpoždění signálu a zhoršuje úroveň přijímaného signálu. Vícecestným šířením signálu vznikají rychlé úniky signálů.

Vícecestným šířením radiového signálu přijímač přijímá přímý signál od vysílače a signály, které do místa příjmu z vysílače dorazí z různých směrů a po různých dlouhých drahách vlivem odrazů, ohybů a rozptylů vysílaného signálu. V diplomové práci byl měřen frekvenčně modulovaný radiový signál (viz. kap. 1.). Spektrálním analyzátozem byl přijímán signál v AVERAGE režimu (průměrování z více měření dle počtu iterací (10)). Z těchto důvodů spektrální analyzátor přijímal konstantní úroveň nosné vlny (frekvenční modulace neovlivňovala úroveň přijímaného signálu).

Z výsledných simulací získaných simulačním programem Radioplan bylo zjištěno, že simulační program ve srovnání s praktickým měřením nedokáže zaznamenat takový počet úniků signálu. Pro co nejpřesnější výsledky je zapotřebí do simulačního programu zakreslit celou zástavbu a vegetaci, která je mezi vysílaným a přijímacím místem. V simulačním programu není možné zaznamenat všechny podmínky, které mají vliv na šíření signálu (počasí, pohyb vozidel, chodců apod.).

## Použitá literatura

- [1] PECHAČ. Šíření vln v zástavbě. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 108 s. ISBN 80-730-0186-1.
- [2] MAZÁNEK, Miloš a Jan JANÍK. *Antény a šíření elektromagnetických vln*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994, 112 s. ISBN 80-010-1067-8.
- [3] RICHTEROVÁ, Marie. *KIS a jejich bezpečnost I: Šíření rádiových vln*. Dostupné z: [https://moodle.unob.cz/pluginfile.php/18130/mod\\_resource/content/1/Šíření%20rádiových%20vln.pdf](https://moodle.unob.cz/pluginfile.php/18130/mod_resource/content/1/Šíření%20rádiových%20vln.pdf)
- [4] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace: Elektronická skripta FEKT VUT v Brně*. 83 s.
- [5] BC. POLÁK, Ladislav. *Simulace vícecestného šíření vícestavových modulací* [online]. Brno, 2009 [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15664](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15664). Diplomová práce. VUT v brně.
- [6] VLČEK, Jiří. *Modulace a přenos signálu*. 1. vyd. Praha: Jiří Vlček, 2001, 70 s. Od analogových radiostanic k digitálnímu systému Pegas u HZS kraje Vysočina Student:. Ostrava, 2007. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [7] *Od analogových radiostanic k digitálnímu systému Pegas u HZS kraje Vysočina Student:.* Ostrava, 2007. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [8] IVÁNEK, Lubomír. *Radiokomunikační řetězec*. Dostupné z: <http://moodle.cs.vsb.cz/course/view.php?id=61>
- [9] ČERNOHORSKÝ. *Antény a šíření elektromagnetických vln*. 2. vyd. Brno: VUT, 1992, 146 s. ISBN 80-214-0379-9. Výkony, limity ČTU a GL č. 12/R/2000. KHnet.info [online].
- [10] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [11] *Encyklopedie EMC: Rušivé signály a jejich zdroje*. [online]. [cit. 2014-09-22]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node7>
- [12] IVÁNEK, Lubomír. *Obecná charakteristika šíření vln v jednotlivých pásmech*. Dostupné z: [http://moodle.cs.vsb.cz/pluginfile.php/10166/mod\\_resource/content/0/Obecna\\_charakteristika\\_sireni\\_vln\\_v\\_jednotlivych\\_pasmech.pdf](http://moodle.cs.vsb.cz/pluginfile.php/10166/mod_resource/content/0/Obecna_charakteristika_sireni_vln_v_jednotlivych_pasmech.pdf)

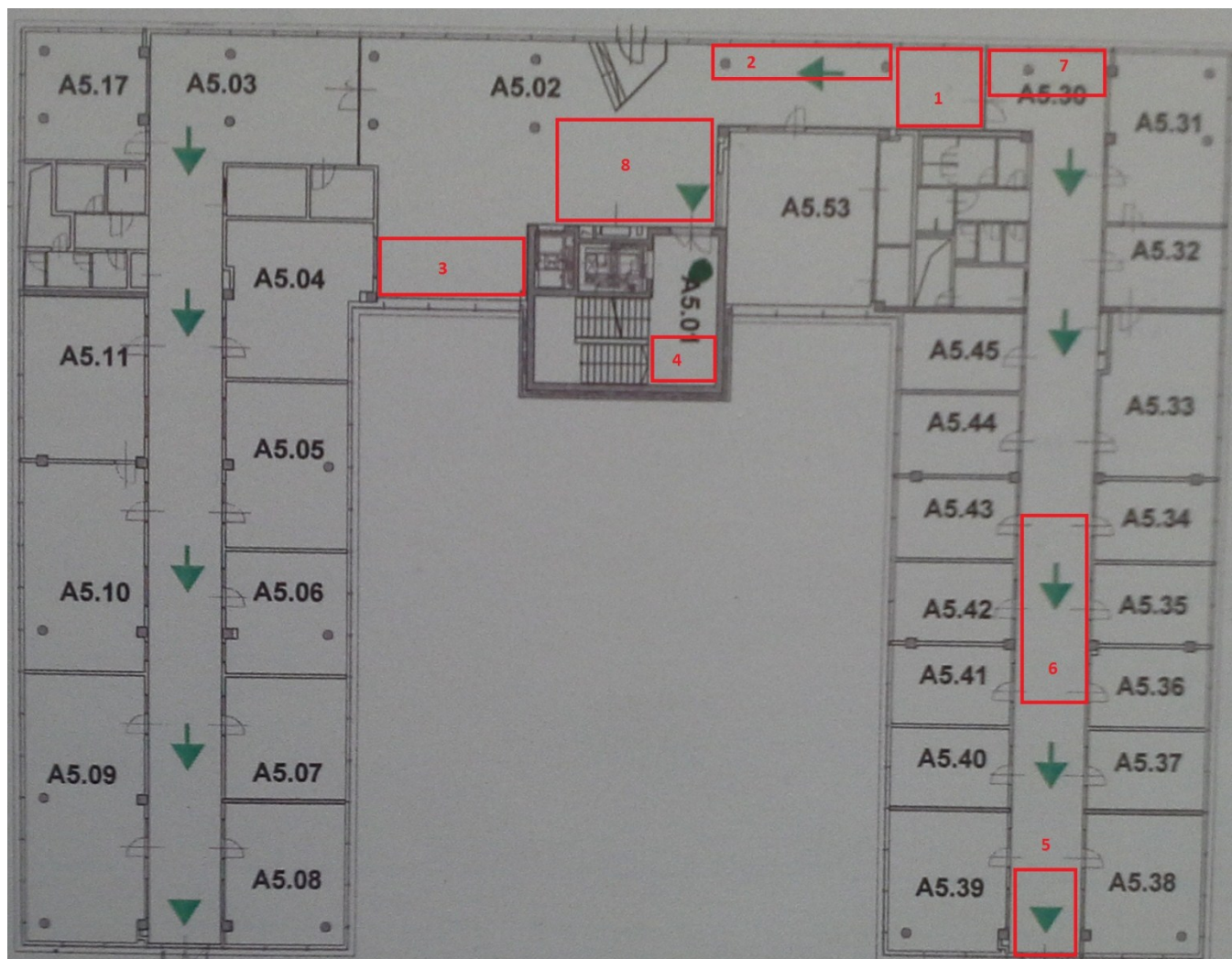


- [13] IVÁNEK, Lubomír. *Faktory působící na šíření radiových vln, atmosférická absorpce, absorpce povrchové vrstvy, atmosférický lom*. Dostupné z: <http://moodle.cs.vsb.cz/mod/resource/view.php?id=2982>
- [14] IVÁNEK, Lubomír. *Druhy šíření radiových vln: Druhy šíření radiových vln*. Dostupné z: [http://moodle.cs.vsb.cz/pluginfile.php/10161/mod\\_resource/content/0/Druhy\\_sireni\\_radiovych\\_vln.pdf](http://moodle.cs.vsb.cz/pluginfile.php/10161/mod_resource/content/0/Druhy_sireni_radiovych_vln.pdf)
- [15] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 259 s. ISBN 80-010-3032-6.
- [16] WikiSkripta: *Dopplerův jev*. [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Doppleruv\\_jev](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Doppleruv_jev)
- [17] *Bezdrátové systémy v přístupové síti*. [online]. [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=bezdratove-systemy-v-pristupovesiti&%20%20cislocclanku=2008020002%3E>
- [18] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. 1. vyd. Brno: VUT, 2001, 134 s. ISBN 80-214-1833-8.
- [19] *Radiomap.eu: Rozhlasové stanice v Ostravě*. [online]. [cit. 2014-12-22]. Dostupné z: <http://radiomap.eu/cz/ostava>
- [20] Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: *Mapy areálů*. [online]. [cit. 2014-12-25]. Dostupné z: <http://www.vsb.cz/cs/kontakty-a-mapy/mapy-arealu/>
- [21] *SIMULACE VÍCECESTNÉHO ŠÍŘENÍ VÍCESTAVOVÝCH MODULACÍ* [online]. Brno, 2009 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15664](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15664). DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [22] *Radiostanice-vysilacky: Mobilní datové sítě*. [online]. [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.radiostanice-vysilacky.cz/radiostanice/radiostanice-motorola/radiomodemy/mobilni-datove-site/>
- [23] *TRK: Učebnice teorie rádiové komunikace*. [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?%DAvod>

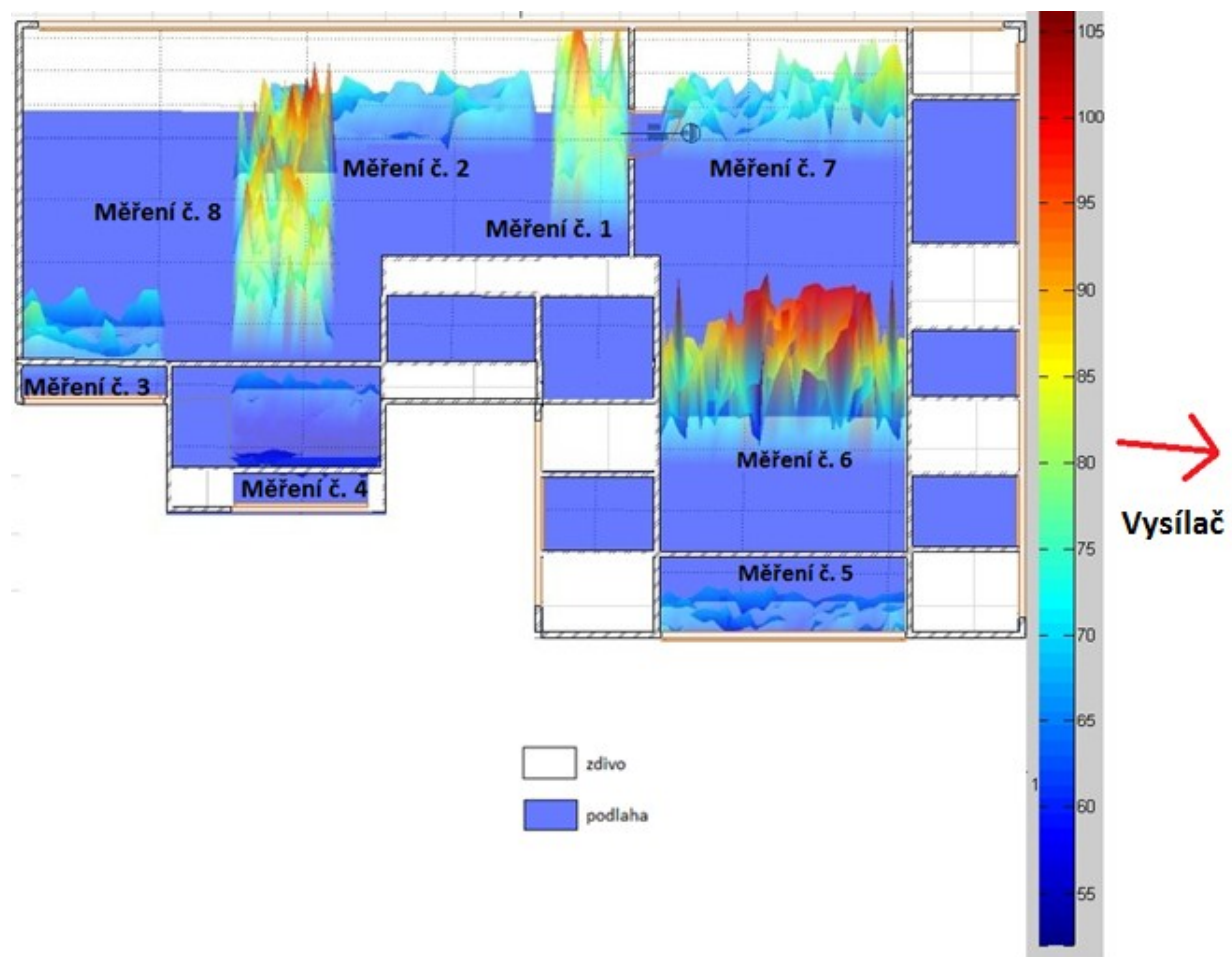
## Seznam příloh

Příloha A:	Plánek 5. patra budovy FEI.....	I
Příloha B:	Úniky signálů na 5. patře budovy FEI (3D model).....	II
Příloha C:	Úniky signálu na 5. patře budovy FEI (půdorys).....	III
Příloha D:	Plánek areálu VŠB.....	IV
Příloha E:	Úniky signálu v areálu VŠB (2D).....	V
Příloha F:	Úniky signálu v areálu VŠB (2D).....	VI
Příloha G:	Úniky signálu v areálu VŠB (2D).....	VII
Příloha H:	Úniky signálu v areálu VŠB (2D).....	VIII
Příloha CH:	Úniky signálu v areálu VŠB (3D).....	IX
Příloha I:	Úniky signálu v areálu VŠB (3D).....	X
Příloha J:	Úniky signálu v areálu VŠB (3D).....	XI
Příloha K:	Úniky signálu v areálu VŠB (3D).....	XII

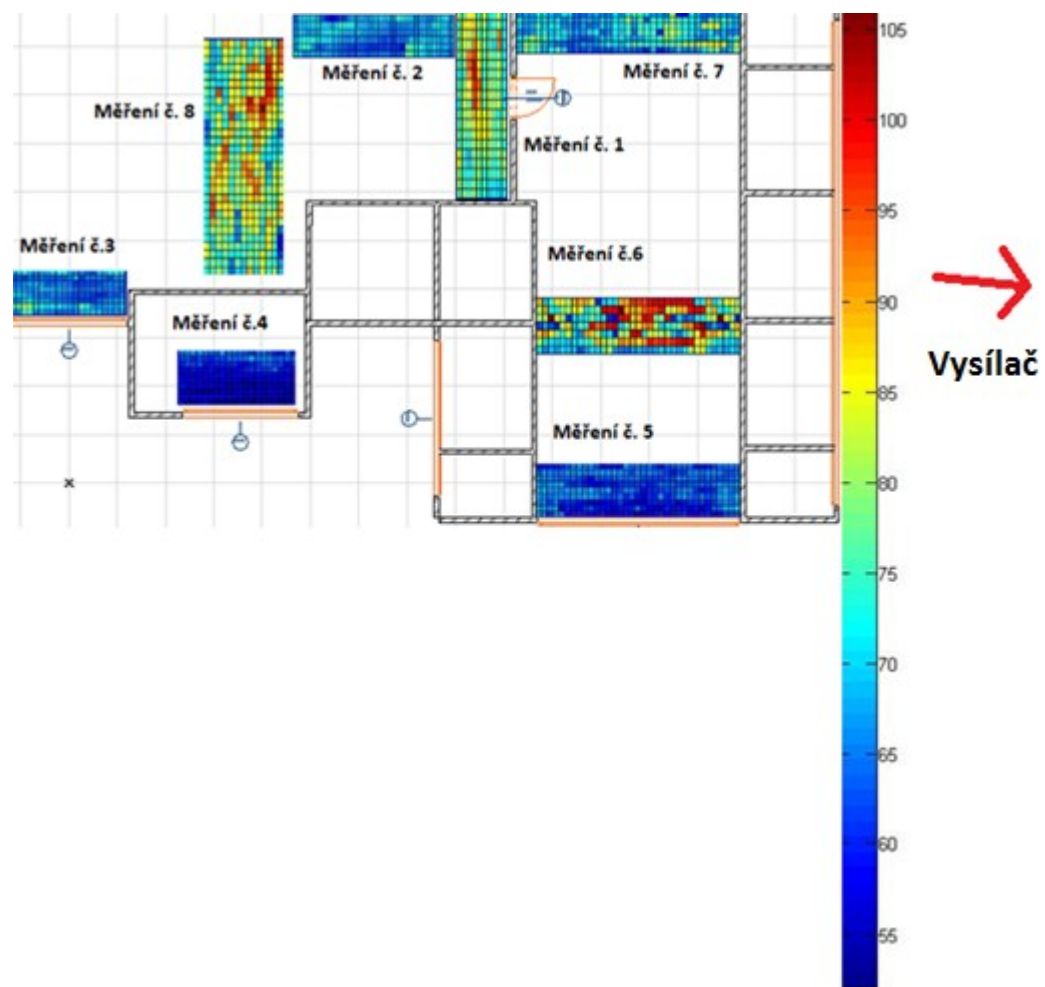
Příloha A: Plánek 5. patra budovy FEI



Příloha B: Úniky signálů na 5. patře budovy FEI (3D model), (úroveň signálu [dBm])



Příloha C: Úniky signálu na 5. patře budovy FEI (půdorys), (úroveň signálu [dBm])

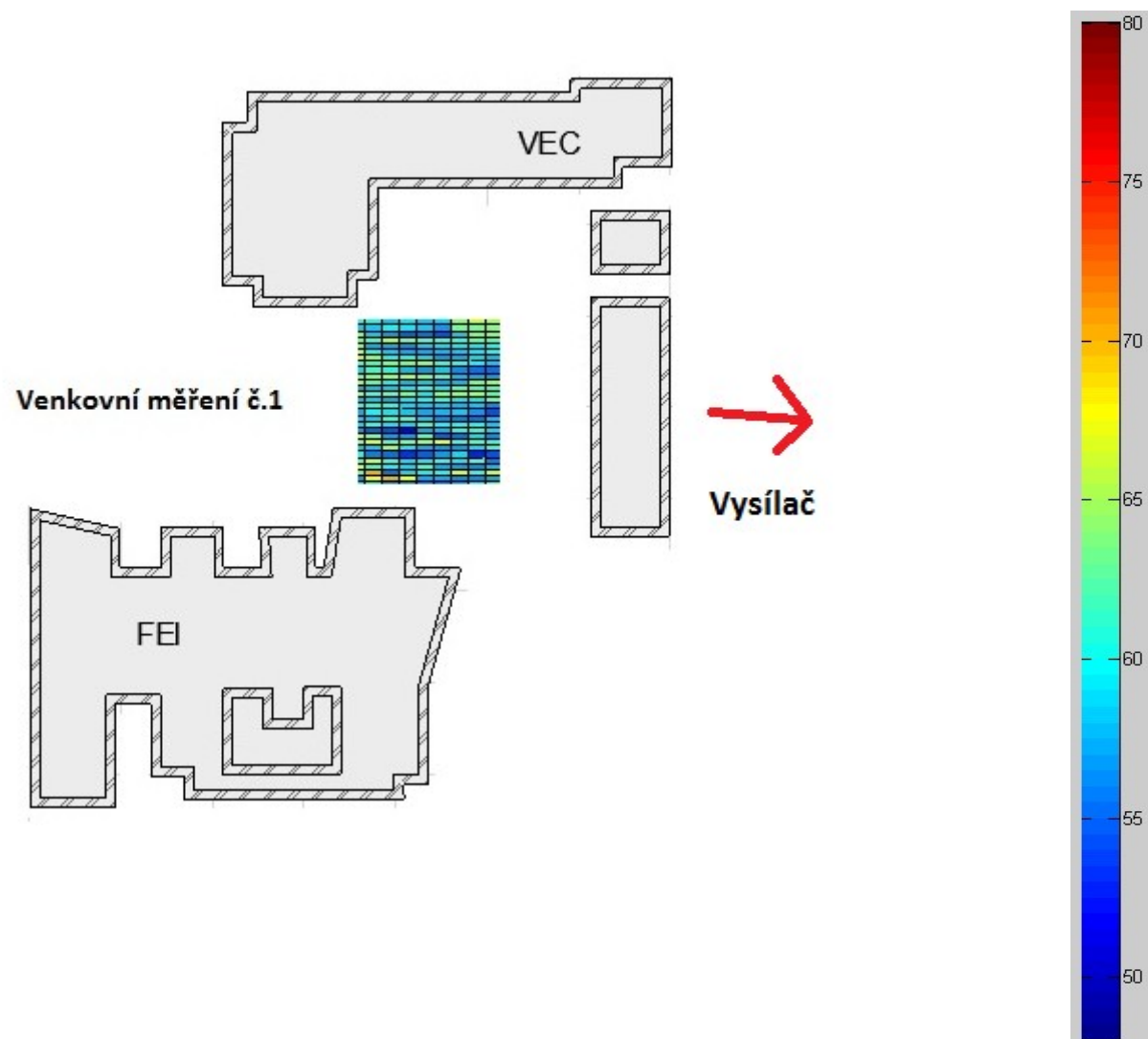


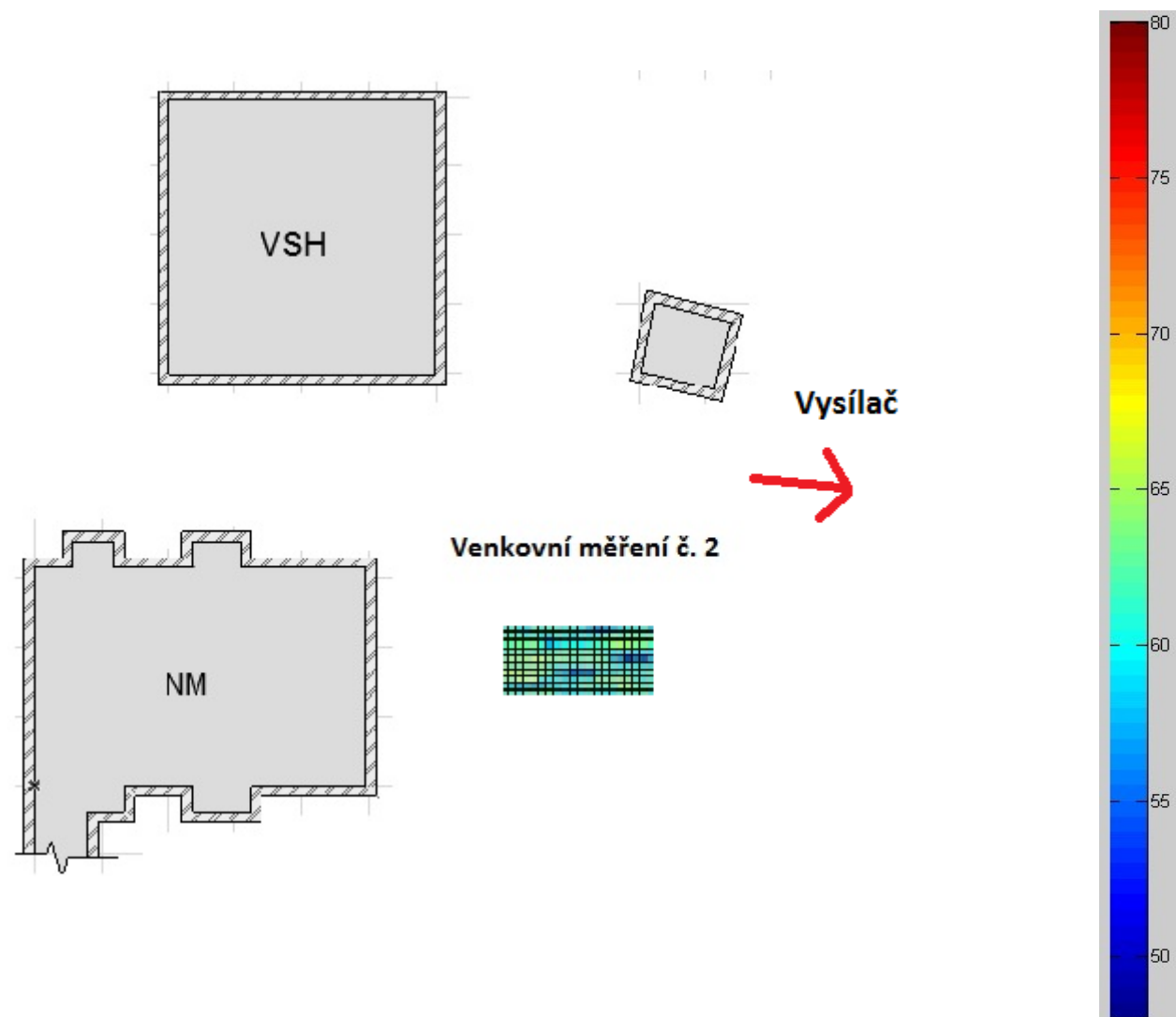
Příloha D: Plánek areálu VŠB [20]



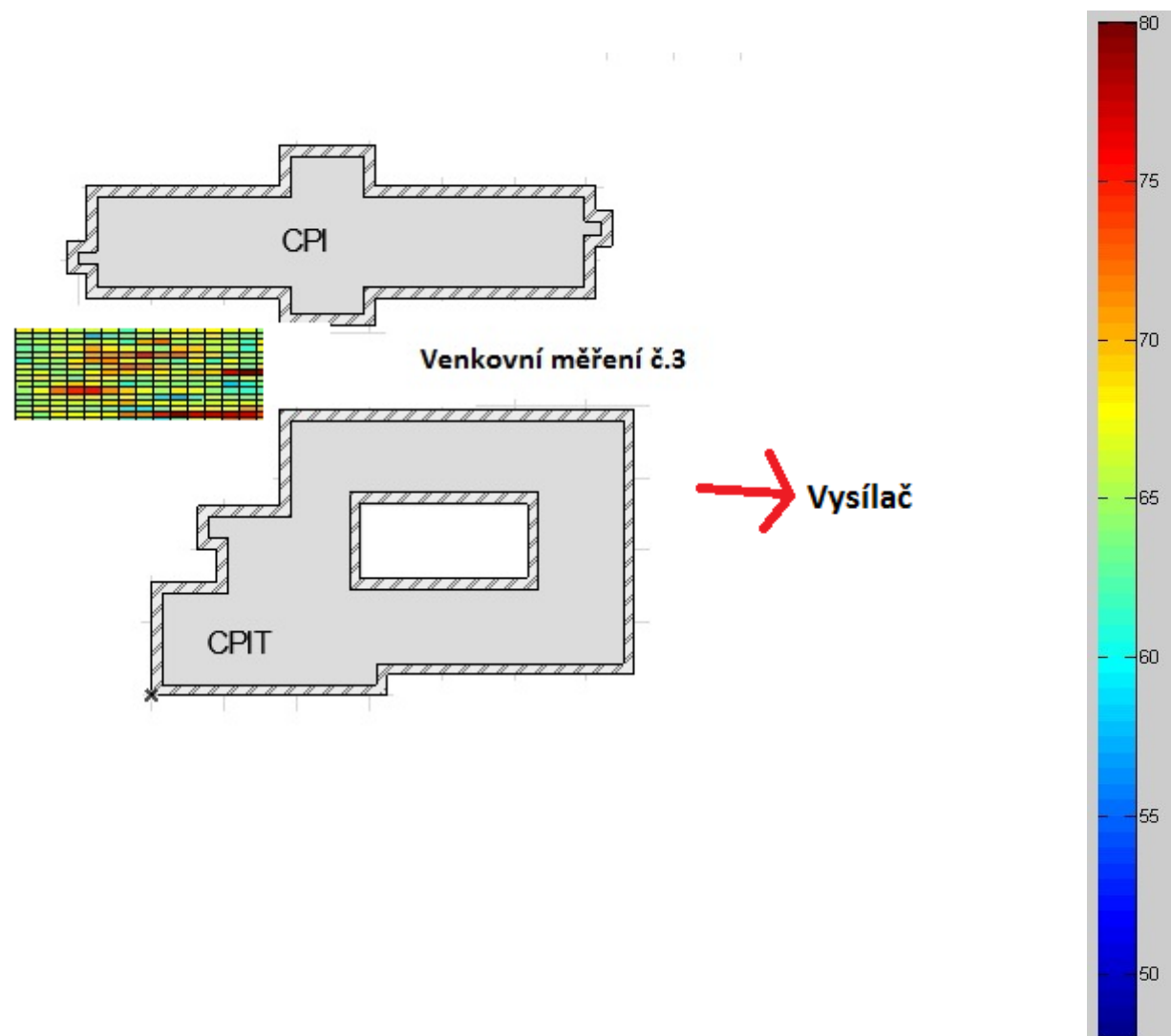


Příloha E: Úniky signálu v areálu VŠB (2D), (úroveň signálu [dBm])

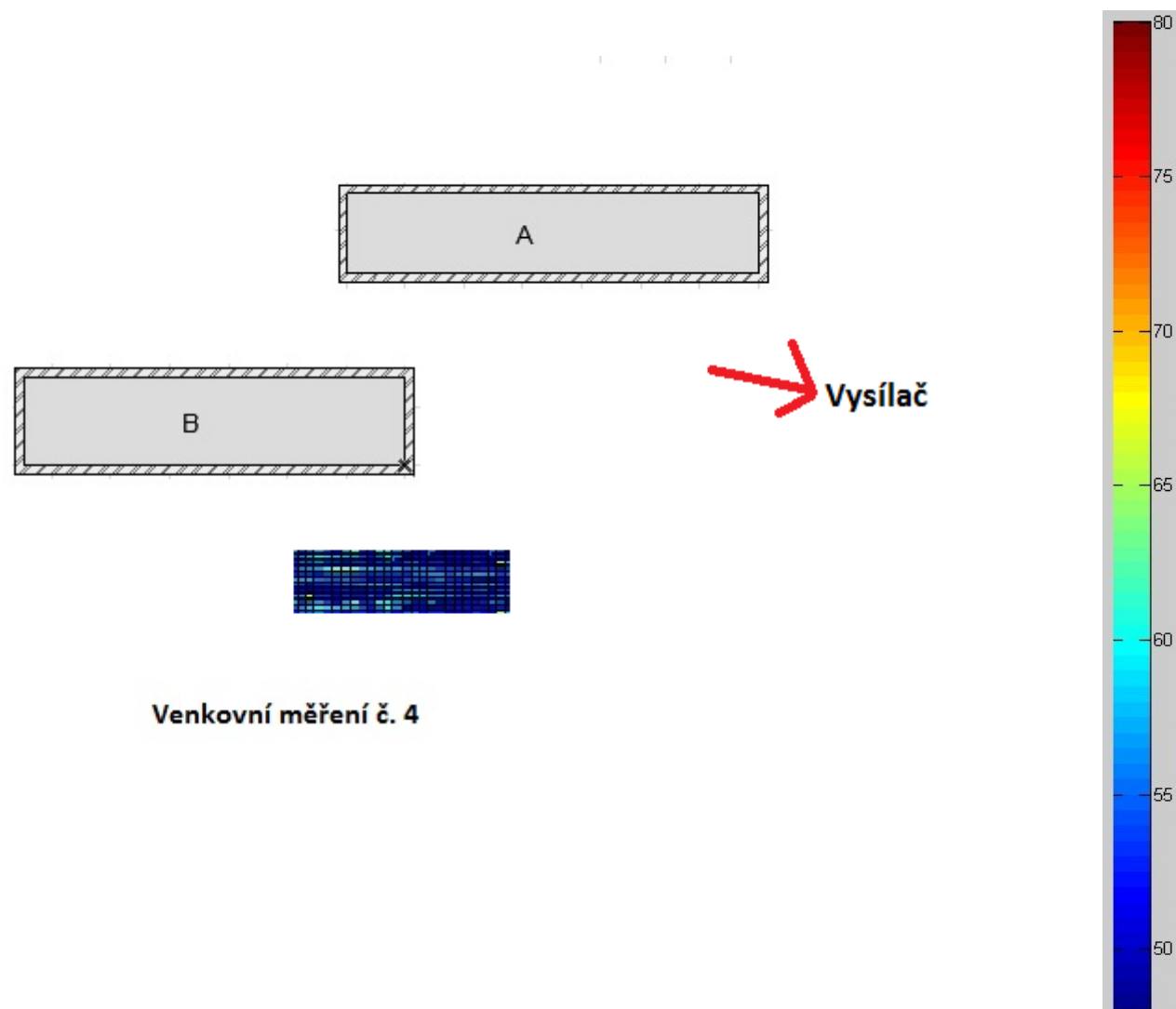




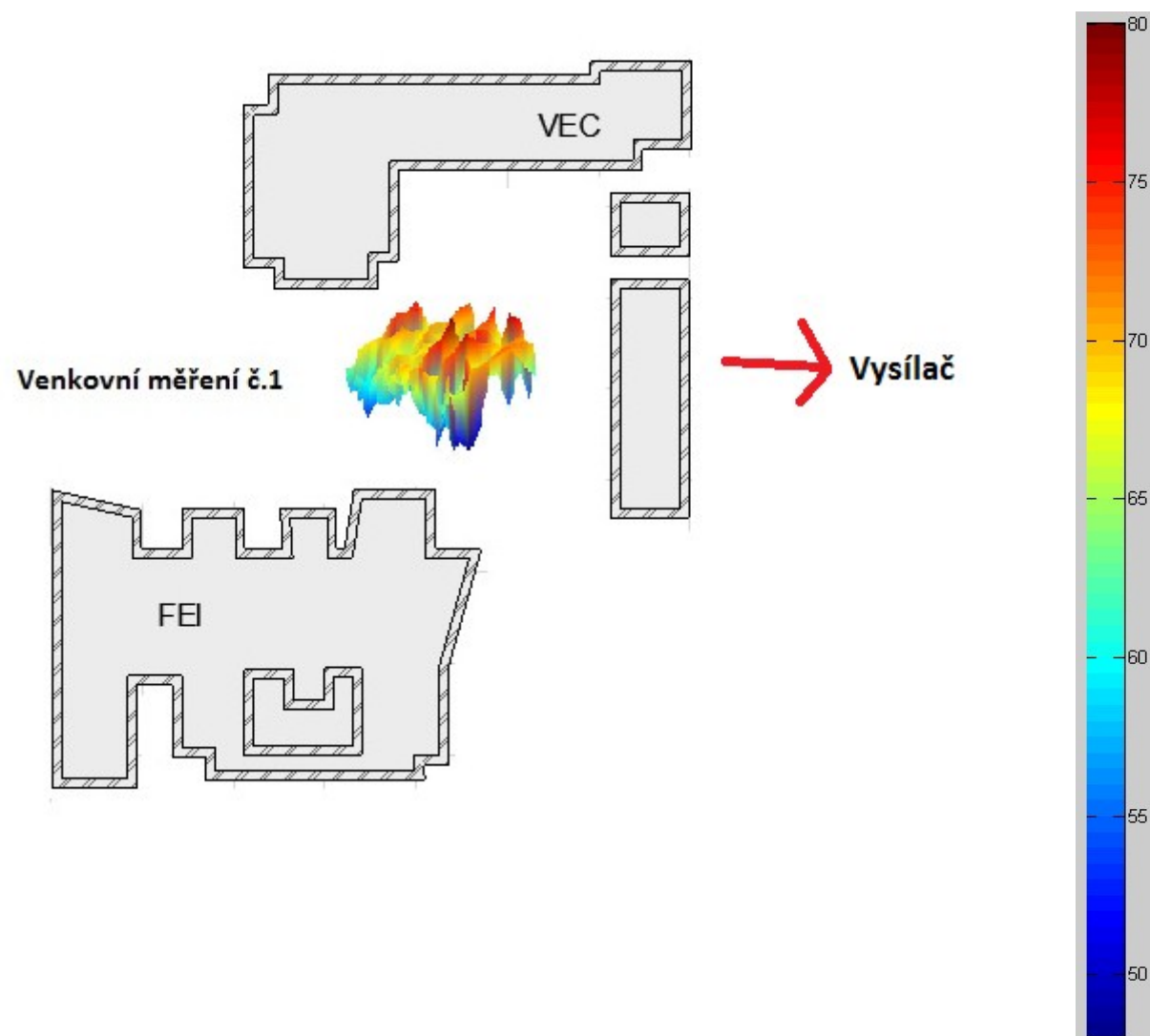




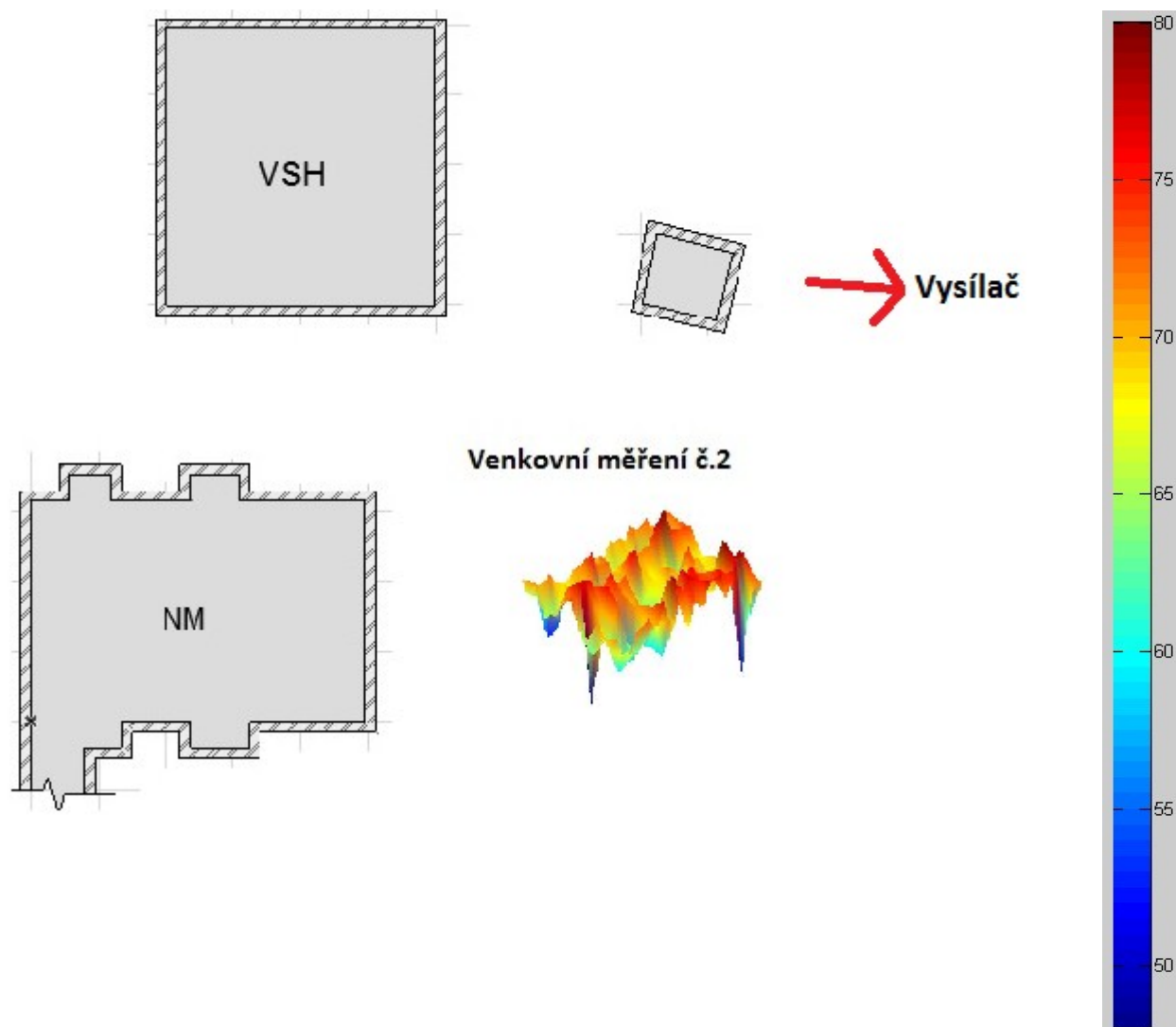
Příloha H: Úniky signálu v areálu VŠB (2D), (úroveň signálu [dBm])

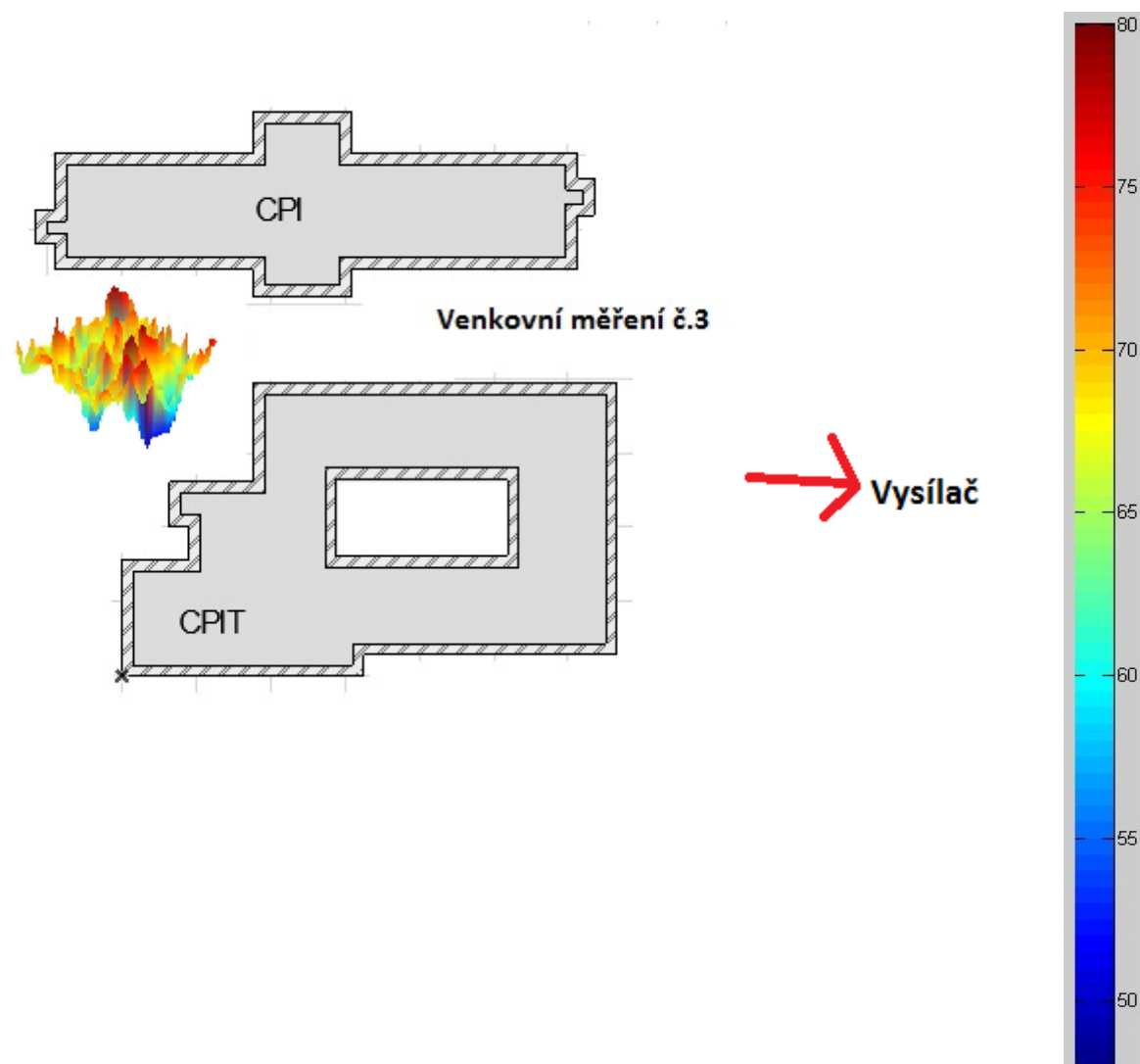


Příloha CH: Úniky signálu v areálu VŠB (3D), (úroveň signálu [dBm])

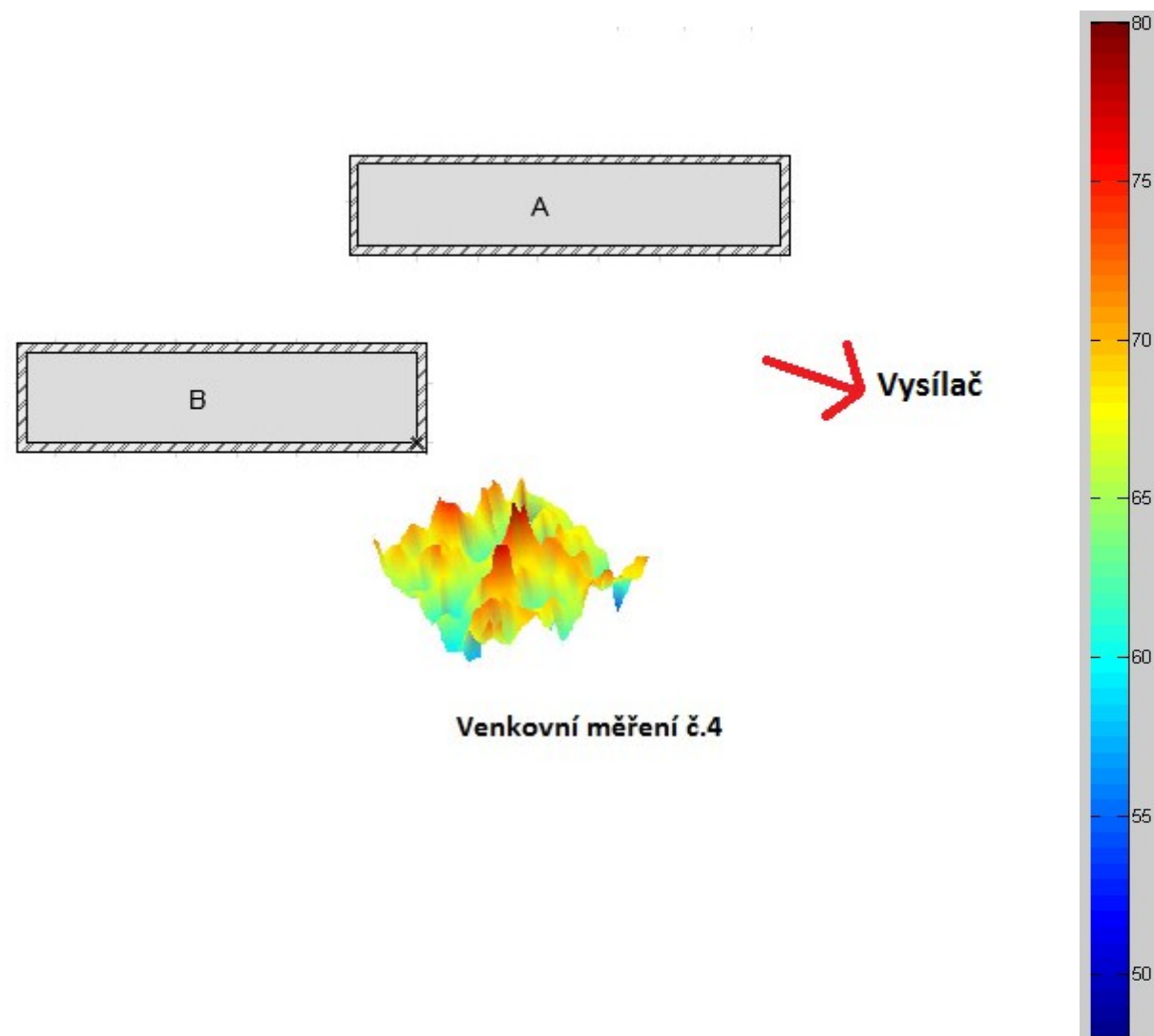


Příloha I: Úniky signálu v areálu VŠB (3D), (úroveň signálu [dBm])





Příloha K: Úniky signálu v areálu VŠB (3D), (úroveň signálu [dBm])



---